

**Universidade de São Paulo  
Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”**

**Ciência do material bambu e tecnologia de sua aplicação em vigas laminadas coladas de  
seção transversal composta**

**Claudia de Lima Nogueira**

Tese apresentada para obtenção do título de Doutora em  
Ciências, Programa: Recursos Florestais. Opção em:  
Tecnologia de Produtos Florestais

**Piracicaba  
2013**

Claudia de Lima Nogueira  
Arquiteta Urbanista

**Ciência do material bambu e tecnologia de sua aplicação em vigas laminadas coladas de  
seção transversal composta**

versão revisada de acordo com a resolução CoPGr 6018 de 2011

Orientador:  
Prof. Dr. **JOSÉ NIVALDO GARCIA**

Tese apresentada para obtenção do título de Doutora em  
Ciências, Programa: Recursos Florestais. Opção em:  
Tecnologia de Produtos Florestais

**Piracicaba  
2013**

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação  
DIVISÃO DE BIBLIOTECA - ESALQ/USP**

Nogueira, Claudia de Lima

Ciência do material bambu e tecnologia de sua aplicação em vigas laminadas coladas de seção transversal composta / Claudia de Lima Nogueira. - - versão revisada de acordo com a resolução CoPGr 6018 de 2011. - - Piracicaba, 2013. 166 p: il.

Tese (Doutorado) - - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", 2013.

1. Adesivos 2. Bambu 3. Colagem 4. Laminados 5. Propriedades mecânicas  
6. Vigas I. Título

CDD 676.14  
N778c

**"Permitida a cópia total ou parcial deste documento, desde que citada a fonte – O autor"**

Dedico o presente trabalho  
aos meus pais, Neusa e  
Francisco Pedro



## AGRADECIMENTOS

- Ao amigo e orientador Professor Titular José Nivaldo Garcia, pelos ensinamentos técnicos, por ter aberto as portas do Laboratório de Engenharia da Madeira e pela sincera amizade;
- Ao técnico do Laboratório de Máquinas e Engenharia da Madeira (LEM/ESALQ), Luiz Eduardo Facco pela colaboração prática na pesquisa;
- À amiga Maria Aparecida R. Bermudez pelo carinho, pelas conversas e pela amizade que se iniciou já no curso de mestrado;
- À técnica do Laboratório de Histopatologia e Biologia Estrutural de Plantas (CENA/USP), Mônica Lanzoni Rossi pelo apoio técnico com o Microscópio Eletrônico de Varredura;
- À técnica do Laboratório de Anatomia Vegetal (LCB/ESALQ), Marli Kasue Misaki Soares pelo apoio técnico com o Microscópio Óptico de Fluorescência;
- À professora Célia Regina Montes por disponibilizar a estrutura do laboratório de microscopia do núcleo de pesquisa em geoquímica e geofísica da litosfera (Nupegel) e pela assistência técnica-científica no preparo de micrografias;
- Aos professores Elliot Watanabe Kitajima e Francisco André Ossamu Tanaka por disponibilizarem a estrutura do Núcleo de Apoio à Pesquisa em Microscopia Eletrônica Aplicada a Agricultura (NAP/MEPA) e os equipamentos de microscopia;
- À professora Beatriz Appezzato da Glória pelo convite para participar da comissão organizadora do 18º e 19º Siicusp, pela disponibilização do laboratório para análise microscópica das amostras e pela nova amizade;
- Aos professores Adriana Maria Nolasco, Geraldo Bortoleto Jr e José Nivaldo Garcia, por terem me dado as oportunidades de estagiar como docente em suas disciplinas;

- Aos amigos da serraria: Branquinho, Magrão, Maguila, Palhinha, Sidney e em especial ao Juca e Emílo que não mediram esforços em ajudar na preparação dos corpos de prova e componentes da viga;
- Ao pessoal da Estação Experimental de Ciências Florestais de Anhembi por coletar os colmos de bambu para os experimentos exploratórios;
- Aos graduandos, pós graduandos e estagiários do Laboratório de Engenharia da Madeira Adriana Carolina Ahumada, Bruno Balboni, Bruno Mantega, Diana Sabogal, Guilherme Pontes, Jaime Andrés Unriza, Priscila Sicari, Márcia, Aline, Mônica e Celso por estarem sempre ao meu lado durante essa etapa da minha vida;
- Às amigas Ruli e Maris com quem pude compartilhar os momentos de euforia da vida acadêmica;
- À minha primeira co-orientada oficial, Julia Carolina Fideles com quem compartilhei as experiências de desenvolvimento da técnica de produção de painéis laminados e de vigas laminadas coladas;
- À professora Luciana Duque Silva pela solidariedade prestada durante o curso de doutorado;
- À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior pela concessão da bolsa de estudos;
- À Universidade de São Paulo pelo ensino gratuito.

“Conheça todas as teorias, domine todas as técnicas, mas ao tocar em uma alma humana, seja apenas outra alma humana”

*Carl Jung*



## SUMÁRIO

RESUMO.....	13
ABSTRACT.....	15
1 INTRODUÇÃO.....	17
1.1 Objetivo geral .....	18
1.2 Objetivos específicos.....	18
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	19
2.1.1 Colmos.....	22
2.1.1.1 Anatomia.....	23
2.2 Propriedades físicas.....	30
2.3 Propriedades mecânicas.....	31
2.4 Molhabilidade.....	41
2.5 Aplicações dos colmos.....	43
2.5.1 Arquitetura com bambu.....	46
3 MATERIAL E MÉTODOS.....	53
3.1 Material oriundo de touceira manejada.....	55
3.2 Material oriundo de touceira não manejada.....	56
3.3 Processamento de transformação de ripas em lâminas.....	56
3.4 Corpos de prova para os ensaios.....	57
3.4.1 Cisalhamento radial longitudinal.....	58
3.4.1.1 Ripa.....	58
3.4.1.2 Lâmina.....	58
3.4.1.3 Análise da ruptura sob microscópio estereoscópio.....	59
3.4.2 Cisalhamento tangencial longitudinal.....	59
3.4.2.1 Ripa.....	59
3.4.2.2 Lâmina.....	60
3.4.2.3 Análise da ruptura sob microscópio estereoscópio.....	60
3.4.2.4 Laminado colado com (PVA).....	61
3.4.2.4.1 Análise sob Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV).....	63
3.4.2.5 Laminado colado com Resorcinol Formaldeído (RF).....	64
3.4.2.5.1 Análise sob Microscopia Óptica (MO).....	65
3.4.2.5.2 Adesão entre lâminas vista no MEV.....	66
3.4.2.5.3 Adesão entre lâminas vista no Microscópio Ótico de Fluorescência (MOF).....	67

3.4.3	Flexão.....	68
3.4.3.1	Ripa.....	68
3.4.3.2	Lâmina.....	68
3.4.3.3	Laminado colado com RF.....	69
3.4.3.4	Viga simples.....	70
3.4.3.4.1	Painéis individuais de composição da viga simples.....	70
3.4.3.4.1.1	Montagem da viga simples.....	72
3.4.3.5	Viga I.....	74
3.4.3.5.1	Painéis individuais de composição da viga I.....	74
3.4.3.5.1.1	Reprocessamento das superfícies e ajustes dos painéis individuais.....	75
3.4.3.5.2	Produção das mesas.....	76
3.4.3.5.3	Produção das almas.....	78
3.4.3.5.4	Ligação mesa/alma.....	80
3.4.3.5	Análises estatísticas.....	81
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	83
4.1	Cisalhamento radial longitudinal.....	83
4.1.1	Ripa.....	83
4.1.2	Lâmina.....	94
4.2	Cisalhamento tangencial longitudinal.....	100
4.2.1	Ripa.....	100
4.2.2	Lâmina.....	104
4.2.3	Laminado colado com PVA.....	107
4.2.3.1	Análise sob a Microscopia Eletrônica de Varredura.....	110
4.2.4	Junta colada com RF.....	113
4.2.4.1	Análise sob a Microscopia óptica.....	116
4.2.4.2	Análise sob a Microscopia Eletrônica de Varredura.....	123
4.2.4.3	Análise sob a Microscopia de Fluorescência .....	127
4.3	Flexão.....	130
4.3.1	Ripa.....	130
4.3.2	Lâmina.....	137
4.3.3	Laminado colado de duas lâminas.....	142
4.3.4	Ripas, lâminas e laminado colado .....	146
4.3.5	Viga simples.....	149

4.3.6 Viga I.....	156
5 CONCLUSÕES.....	161
REFERÊNCIAS.....	163



## RESUMO

### **Ciência do material bambu e tecnologia de sua aplicação em vigas laminadas coladas de seção transversal composta**

No presente trabalho avaliou-se a resistência mecânica do bambu nos estágios pré e pós processamento mecânico para servir de referências básicas do estudo das propriedades mecânicas de vigas laminadas coladas simples, de seção composta e de seção composta na forma de I, industrializadas em laboratório. Iniciou-se com a caracterização do material bruto na forma de ripa que representa toda a parede do colmo, passando-se pelo material processado na forma de lâmina que representam a parte industrialmente útil da parede do colmo e culminando na manufatura e qualificação das vigas laminadas coladas. Na produção dos corpos de prova do material bruto manteve-se a espessura original da ripa, exceto para alguns produzidos para se avaliar a resistência ao cisalhamento radial das camadas interna e externa da parede do colmo. As ripas foram usinadas em diversas máquinas para serem transformadas em lâminas que são as unidades de composição das seções compostas pela técnica de aglutinação e adesão a frio. Foi estudada também a influência do nó na resistência ao cisalhamento radial e tangencial tanto do material sólido quanto do plano de cola e nas propriedades da flexão. A geometria e as dimensões dos corpos de prova de cisalhamento foram adaptadas da norma ASTM D 905 e os de flexão da norma NBR 7190. As resistências ao cisalhamento no plano de cola e as propriedades da flexão foram determinadas segundo três combinações de faces de contato no processo de colagem com o adesivo à base de resorcinol-formaldeído (RF). Estudou-se também a pressão adequada para colagem dos corpos de prova e eleita a mais adequada à colagem de vigas laminadas coladas. Os corpos de prova intactos e rompidos nos ensaios foram observados em microscópio eletrônico de varredura, em microscópio óptico, em microscópio óptico de fluorescência e microscópio estereoscópico. Observou-se ampla variabilidade das propriedades mecânicas tanto do material sólido quanto do material composto, mas em qualquer dos casos de resistência houve ampla variabilidade dos dados e, no geral o material sem nó foi mais resistente do que o com nó. As rupturas ocorreram na maioria das vezes no tecido parenquimático desviando-se dos feixes de fibras e tendendo a seguir a grã do material observando que o plano de ruptura só coincide com o plano planejado para a ruptura quando o corpo de prova é feito com a consideração precisa da orientação da grã. Os corpos de prova montados com a cola à base de PVA e com lâminas nodais responderam de forma satisfatória à colagem a baixa pressão, enquanto que os fabricados com lâminas internodais apresentaram melhor desempenho a alta pressão. Para os corpos de prova manufaturados com o adesivo à base de RF, a melhor combinação de colagem se deu no contato entre faces externas de lâminas. Foi possível observar a penetração do adesivo nos elementos anatômicos das lâminas com o uso da microscopia óptica e de fluorescência. As vigas laminadas coladas de seção transversal composta foram ensaiadas à flexão, mas não romperam por tensão normal, pois apresentaram instabilidade lateral durante o carregamento à flexão. As vigas também apresentaram baixo módulo de elasticidade porque o esmagamento da mesa inferior, nos apoios, foi confundida e somada pelo sistema de medida, ao valor da flecha. Numa análise geral, a qualidade mecânica da Viga “I” pode ser considerada muito boa dentro do correto cálculo do momento de inércia se seções transversais compostas. As camadas perpendiculares ao eixo da viga, tanto na alma quanto na mesa, foram tão eficientes na absorção do esforço cortante que não houve nenhuma limitação de capacidade de carga pela ligação alma-mesa mesmo com a viga trabalhando numa faixa de alta influência de tensões cisalhantes.

**Palavras-chaves:** Bambu; Propriedades Mecânicas; Laminado Colado; Adesão; Viga



## ABSTRACT

### **Science of bamboo material and technology application in glued laminated cross beams composite section**

In this study it was evaluated the bamboo strength in the stages before and after mechanical processing in order to obtain basic references to study the mechanical properties of simple glued laminated beams of composite section and composed section as I joist, manufactured in laboratory scale. It started with the characterization of raw material as strip representing the crude bamboo culm wall, moved to the processed material as in the shape of laminas which were representing the majority of bamboo culm wall industrially useful and culminating to the manufacture and qualification of glued laminated beams. In the production of specimens of raw material it was maintained the original thickness for the strip except for a few ones which were produced to evaluate the radial shear strength in the inner and outer layers of the culm wall. The strips were machined on some machines to be turned into laminas that were the units for assembling composite sections by agglutination and adhesion under pressure in environmental conditions. It was also studied the node influence in the radial and tangential shear strength in both solid material and in the adhesive plan and in properties got from the bending tests. The geometry and dimensions of the shear specimens were adapted from ASTM D 905 and the bending from NBR 7190. Shear strength in the adhesive plane and bending property were determined following three combinations of contact faces on the gluing process using resorcinol-formaldehyde based adhesive. It was studied also the proper pressure for gluing the specimens and elect the most suitable for glued laminated beams. The intact specimens and failed on mechanical tests were observed under a Scanning Electron Microscope, Optical Microscope, Optical fluorescence microscope and stereomicroscope. It was observed huge variation of mechanical properties in both solid and composite materials, but in all cases there was considerable variability of strength data and in general the material without node was more resistant than with node. The ruptures mechanisms occurred most often in the parenchyma tissue by passing the fiber bundles and tend to follow the grain of the material by observing the rupture plane that only coincides with the plan designed to rupture when the specimen is done with precise consideration of grain orientation. The specimens manufactured with PVA adhesive and components with nodes responded satisfactorily to the low pressure bonding, while the specimens produced with internodes components performed better at high pressure. For specimens manufactured with resorcinol-formaldehyde adhesive the best gluing combination was given by the contact of outer laminas surfaces to each other. It was possible to observe the anchorage of the adhesive into the anatomical tissues by using optical microscopy and fluorescence optical microscopy. Glued laminated beams with composite cross section were tested in bending, but not failed by normal stresses, once there occurred only lateral instability during loading time. The I beams also showed low modulus of elasticity because the crush in the inferior flange was added by the measurement system to the bending deflection. In general the mechanical quality of the "I" joist can be considered very high with correct calculation of the moment of inertia of composite cross sections. The layers perpendicular to the beam axis both in web and in the flanges, were so efficient in absorbing the shear that there was no limitation of carrying load web-flange connection even with the beam working in a critical influence of high shear stresses.

**Keywords: Bamboo; Mechanical Properties; Glued Laminated; Adhesion; Beam**



## 1 INTRODUÇÃO

Frente à atual crise socioambiental, crise energética, aquecimento global, poluição e insustentabilidade tem-se intensificada, nas últimas duas décadas, a procura por materiais de construção eco-eficientes e que provoquem o menor impacto ambiental possível tanto na sua fabricação quanto no seu uso propriamente dito e no seu descarte. Toda matéria prima transformada em produto deve obrigatoriamente passar por um processo industrial que se inicia com a extração da matéria prima, demanda energia, consome água e, infelizmente, gera resíduos. Espera-se idealmente que os materiais sejam provenientes de fontes renováveis e que demandem baixa energia para serem transformados em produtos e, principalmente, que essa energia investida seja recuperada ao fim da vida útil do produto que deve ter sido indispensável durante o seu uso. Nessa visão holística o bambu aparece como uma matéria prima altamente recomendável para fabricação de produtos generalizados, pois é uma planta perene, pouco exigente em qualidade de solo, pouco exigente em água, de rápido crescimento, de elevada resistência mecânica, de boa aparência e aparentemente competitivo pelo fato de ser extremamente utilizado industrialmente nos países asiáticos. O bambu em sua forma natural requer pouca energia para ser transformado em material de construção quando comparado com outros materiais como, por exemplo, o aço que demanda cerca de 60 vezes mais energia para ser transformado num componente estrutural de mesma capacidade de carga que o bambu. A transformação de colmos de bambu, que é uma matéria prima barata, mas que é circular, oco, cônico e contém grande quantidade de nós, de amido e de sílica, em produtos engenheirados demanda alta tecnologia e muito mais energia do que a quantidade necessária para seu uso em bruto.

As dificuldades em se trabalhar com colmos de bambu como material construtivo se resume, basicamente, na sua configuração geométrica e na sua baixa resistência ao cisalhamento radial. Isso limita o porte das estruturas porque por ser oco oferece baixa capacidade de carga de compressão transversal ao seu eixo por neutralizar a eficácia de parafusos e a baixa resistência ao cisalhamento radial limita consideravelmente a capacidade a cargas de tração nas ligações entre colmos. A tecnologia do bambu laminado colado elimina os problemas consequentes da baixa resistência ao cisalhamento e da geometria do colmo e possibilita que o material bambu tenha uma utilização mais racional na engenharia estrutural. O presente trabalho desenvolveu-se dentro da ideia de agregar capacidade de carga ao bambu para torná-lo cientificamente mais conhecido, recomendável e aplicável nas rotinas das construções,

sobretudo em segmentos sociais. O estudo da dança da qualidade ao longo da cadeia de industrialização foi o foco principal da pesquisa pensada para possibilitar a compreensão das vantagens e desvantagens do material engenheirado de bambu e, sobretudo, do seu momento de inércia. As dificuldades de se iniciar com peças esbeltas e chegar-se a vigas de grandes dimensões foram vencidas e a tecnologia de produção de bambu laminado colado foi tornada simples para uso generalizado.

## 1.1 Objetivo Geral

Verificar a resistência mecânica e a rigidez de vigas laminadas coladas de seção composta, produzidas com o bambu da espécie *Dendrocalamus giganteus*.

## 1.2 Objetivos específicos

- Determinar as propriedades mecânicas de resistência ao cisalhamento e à flexão do material bambu da espécie *Dendrocalamus giganteus*;
- Verificar a influência do adesivo à base de PVA e de RF na resistência ao cisalhamento no plano de cola que une lâminas de bambu;
- Verificar a dispersão e ancoragem do adesivo RF nos elementos anatômicos das lâminas através da microscopia eletrônica de varredura, microscopia óptica e microscopia óptica de fluorescência;
- Identificar a melhor combinação de faces de contato (externa=externa (e=e), interna=externa (i=e) e interna=interna (i=i)) para colagem das lâminas de bambu;
- Definir a pressão de colagem mais eficiente para a produção de painéis e vigas laminadas coladas de bambu da espécie *Dendrocalamus giganteus*.;
- Determinar a resistência ao cisalhamento, o módulo de elasticidade e o módulo de ruptura à flexão de vigas laminadas coladas de seção composta.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 Estrutura da planta

O bambu é classificado como planta monocotiledônea, pertencente às angiospermas. É constituído de uma parte aérea denominada colmo com ramos e folha e outra subterrânea caracterizada pela presença de rizomas e raízes. Todas as partes são desenvolvidas segundo o padrão de uma série alternada de nós e entrenós. Os colmos desenvolvem-se a partir dos rizomas com ramificações que classificam os bambus em dois principais grupos, os quais são denominados Leptomorfo (Monopodial) e Paquimorfo (Simpodial) e um subgrupo denominado Metamorfo (Anfipodial).

Os Leptomorfos são conhecidos também como bambus alastrantes que geralmente estão distribuídos em regiões temperadas (HIDALGO-LÓPEZ, 2003). São caracterizados por apresentarem rizomas alongados, finos, de forma cilíndrica e, normalmente, de diâmetro menor que os colmos que irão se originar (Figura 1). Nos nós deste tipo de rizoma há uma gema lateral dormente, que pode se ativar e produzir um novo colmo ou um novo rizoma (HIDALGO-LÓPEZ, 2003).

Os colmos do grupo leptomorfo crescem separados uns dos outros devido à característica dos rizomas e alcançam a altura máxima entre 30 e 80 dias (CRUZ, 2002) e são representados principalmente pelo gênero *Phyllostachys*.

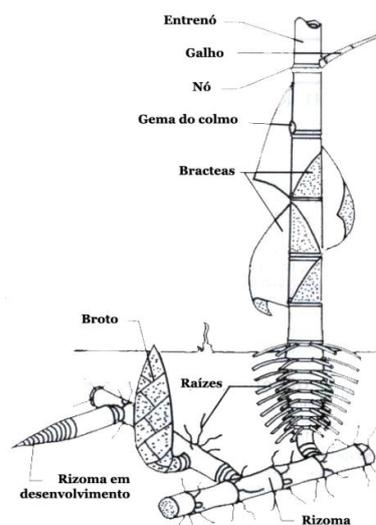


Figura 1 – Sistema de desenvolvimento do rizoma e colmo do grupo leptomorfo  
Fonte: Hidalgo-López (2003) adaptado.

Os Paquimorfos são também denominados entouceirantes e são típicos de regiões tropicais (HIDALGO-LÓPEZ, 2003). O rizoma do tipo paquimorfo é diferente do anterior, pois possui a forma de bulbo e entrenós curtos. Contém gemas laterais dormentes que se ativam e desenvolvem novos rizomas e colmos. Os rizomas crescem próximos uns dos outros originando colmos e, no ano seguinte, uma das gemas se ativa formando um novo rizoma e, na sequência, um novo colmo (Figura 2). Os colmos com esse tipo de rizoma alcançam, de acordo com CRUZ (2002), a altura máxima entre 80 e 180 dias e, segundo Hidalgo-López (2003), são representados principalmente pelos gêneros *Bambusa* e *Dendrocalamus*.

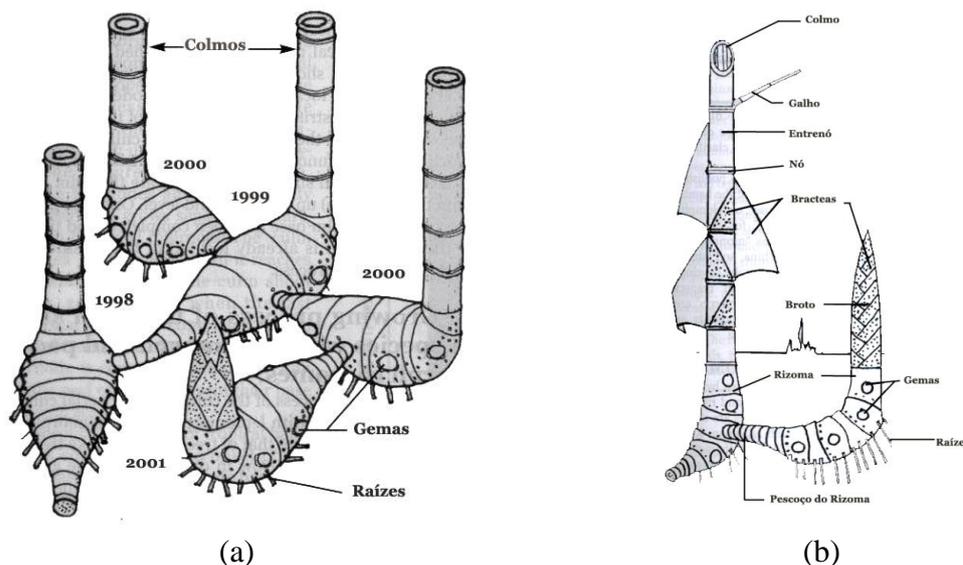


Figura 2 – Sistema de desenvolvimento do rizoma (a) e do colmo (b) do grupo paquimorfo  
 Fonte: Hidalgo-López (2003) adaptado.

Os metamorfos também são classificados como semi entouceirante, pois seus rizomas produzem rizomas dos tipos paquimorfo e leptomorfo na mesma planta (Figura 3). O pico do período de brotação ocorre quando a temperatura do solo a 10 cm da superfície atinge 10°C. Tanto a gema do rizoma quanto a da base lateral do colmo subterrâneo produzem brotos, devido ao sistema do rizoma anfipodial resultando num padrão de distribuição misto dos colmos. Os colmos do grupo metamorfo atingem a altura máxima em 90 dias (HIDALGO-LÓPEZ, 2003).

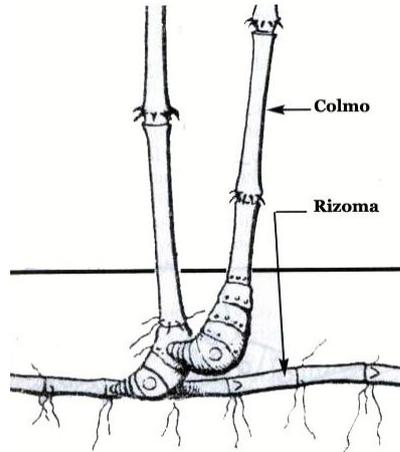


Figura 3 – Sistema de desenvolvimento dos rizomas do subgrupo metamorfo  
 Fonte: Hidalgo-López (2003) adaptado.

Todos os continentes, com exceção da Europa, têm espécies nativas de bambu. A maior concentração está nos países asiáticos. Na África e Austrália ocorre o menor número de espécies (Figura 4). De acordo com Wang e Shen, citados por Ahmad (2000), existem cerca de 70 gêneros e mais de 1500 espécies de bambu no mundo.

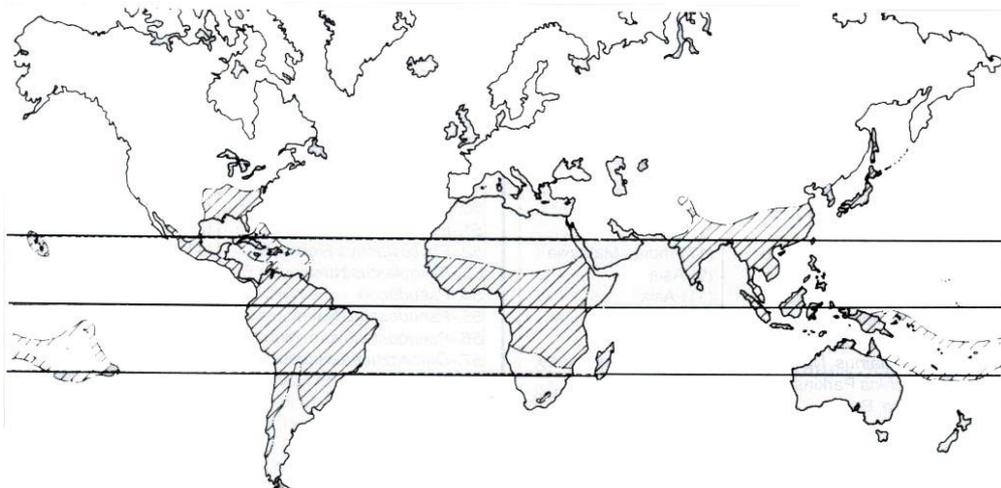


Figura 4 – Distribuição original de bambus no mundo  
 Fonte: Hidalgo-López (2003).

Existem na América, de acordo com Hidalgo-López *apud* Cruz (2002), cerca de 290 espécies correspondentes a 18 gêneros, cuja distribuição estende-se desde a parte oriental dos Estados Unidos até Argentina e Chile e desde o nível do mar até às regiões mais altas dos Andes.

### 2.1.1 Colmos

Os colmos são originados dos rizomas, constituem a parte aérea da planta e são formados por uma sequência de entrenós, nós e diafragma. No geral, grande parte das espécies é caracterizada por colmos de entrenós ocos separados transversalmente uns dos outros por diafragmas que se exibem como nós na parte externa do colmo. Na maioria das espécies o comprimento dos entrenós varia de 20 a 35 cm e dentro de um mesmo colmo o comprimento do entrenó aumenta da base para o topo. Na Figura 5 observa-se o um colmo do grupo paquimorfo mostrado em corte, com indicação das partes constituintes da planta.

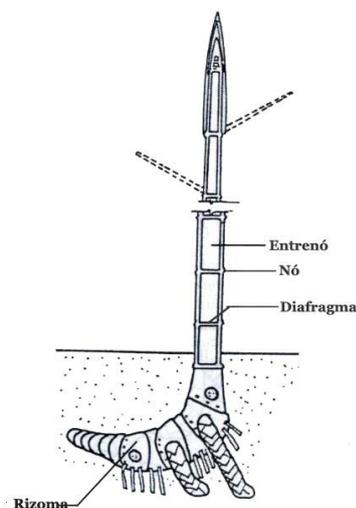


Figura 5 – Corte de um colmo de bambu pertencente ao grupo paquimorfo

Fonte: Hidalgo-López (2003) adaptado.

Embora haja espécies de colmos maciços, a maioria apresentam colmos cônicos, ocos, com diâmetros variando entre 2 e 30 cm e altura entre 30 e 40 m.

O Crescimento do bambu depende da espécie, mas geralmente todas amadurecem rapidamente e segundo Lee et al. (1994), o bambu amadurece com idade entre 3 e 5 anos, sendo a planta de crescimento mais rápido do planeta. De acordo com Aminuddin e Abd.Latif, citados por Ahmad (2000), em uma moita de bambu pode haver 40 a 50 colmos que acrescentam anualmente outros 10 a 20 colmo, os quais alcançam altura máxima na idade de 4 a 6 meses de idade a um incremento médio diário de 15 a 18 cm. Essa característica peculiar do bambu é importante para o incentivo de sua utilização industrial. O diâmetro do colmo permanece o mesmo desde o principio e, por essa razão, não serve para indicar a idade da planta que pode ser inferida pelo aspecto e aparência da superfície externa do colmo.

Aos 2 anos de idade o bambu já pode ser utilizado na fabricação de painéis e aos 3 anos já é considerado maduro, de resistência máxima e pode ser utilizado em laminados estruturais estruturais (HIDALGO-LÓPEZ, 2003).

### 2.1.1.1 Anatomia do colmo

A estrutura da seção transversal do colmo é caracterizada pela presença de fibras, feixes vasculares (xilema e floema) e parênquima (GROSSER e LIESE, 1971). Os feixes vasculares são formados pelo xilema, com dois vasos do metaxilema, pelo floema com tubos crivados conectados por células companheiras e pelo protoxilema. Os vasos do xilema e os tubos crivados do floema são envolvidos por bainhas de esclerênquima, mas há espécies que apresentam feixes de fibras isolados em um lado ou em ambas as extremidades do feixe vascular. De acordo com Liese (1985), existem nas espécies do grupo Leptomorfo, como por exemplo no *Phyllostachys edulis*, quatro bainhas de esclerênquima que circundam os feixes vasculares e nas espécies do grupo Paquimorfo como é o caso do gênero *Dendrocalamus*, ocorrem, além das quatro bainhas de esclerênquima, feixes de fibras adicionais e separados do feixe vascular. O arranjo e a forma com que o tecido do esclerênquima se apresenta em relação aos feixes vasculares dentro da parede do colmo, foi estudada por Grosser e Liese (1971) que classificaram os feixes fibrovasculares como sendo dos tipos I a IV. Posteriormente Ya e Xu adicionaram o tipo V (HIDALGO-LÓPEZ, 2003) e Grosser e Liese adicionaram o tipo VI (LYBEER AT. AL, 2006). Na Figura 6 observa-se um corte transversal da parede do colmo de uma espécie *D. giganteus* com indicação dos seus elementos anatômicos.

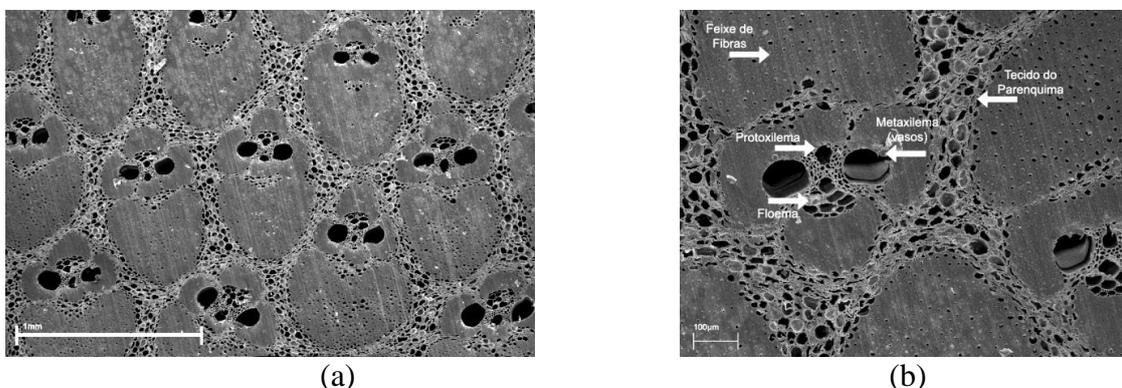


Figura 6 – Seção transversal da parede do colmo de bambu da espécie *Dendrocalamus giganteus* (a) com identificação dos elementos anatômicos constituintes do tecido (b)

Fonte: Nogueira (2008).

Segundo Li (2004), os feixes vasculares vistos na seção transversal não estão uniformemente distribuídos na parede do colmo (Tabela 1). São mais abundantes na camada periférica e, embora o número total de feixes vasculares diminua ao longo da altura do colmo, é no topo que ocorre a maior concentração deles. O autor desenvolveu uma pesquisa sobre a concentração de feixes vasculares em camadas da parede e ao longo da altura de colmos de 1, 3 e 5 anos de idade. A concentração mais elevada dos feixes vasculares (467 feixes por cm<sup>2</sup>) ocorreu na região do topo do colmo de 3 anos de idade. O autor afirmou que para a espécie *Phyllostachys edulis* 50% a 80% dos feixes vasculares estão localizados na camada externa, 10 a 35% na intermediária e 10 a 20% na camada interna.

Tabela 1 – Concentração dos feixes vasculares (feixes/cm<sup>2</sup>) na parede e em segmentos da altura do colmo de *Phyllostachys edulis*

Idade (anos)	Altura	Camada externa	Camada intermediária	Camada interna
1	Base	346	174	105
	Meio	344	232	153
	Topo	392	297	214
3	Base	292	155	126
	Meio	378	213	135
	Topo	467	256	163
5	Base	298	175	117
	Meio	369	193	146
	Topo	458	295	148

Fonte: Li (2004) adaptado

Em pesquisa do mesmo gênero, Beraldo e Zoulalian também subdividiram a parede de colmos de *D. giganteus* e *P. viridis* (RIVERO, 2003) em 3 camadas e analisaram as porcentagens de vasos, fibras e parênquima encontradas em cada camada (Tabela 2).

Tabela 2 - Distribuição dos elementos anatômicos (%) dentro de camadas da parede do colmo

Camada do colmo	<i>Dendrocalamus giganteus</i>			<i>Phyllostachys viridis</i>		
	Vasos	Fibras	Parênquima	Vasos	Fibras	Parênquima
Interna	11	16	73	13	24	63
Intermediária	9	32	59	13	37	50
Externa	8	55	37	10	63	27

Fonte: Rivero (2003).

A camada periférica do colmo é recoberta por tecidos especiais e diferenciados. Na epiderme as células são frequentemente revestidas por uma camada de cutina de celulose e pectina com lamela tangencial formando uma cobertura cerosa. Nessa camada há grande quantidade de sílica na forma de dióxido de silício. Na camada interna da parede do colmo, ou seja, a mais próxima da cavidade central, as células do parênquima formam um tecido espesso constituído por esclereides e que exibem diferenças marcantes entre as espécies (LIESE, 1985).

O bambu apresenta, em média, 40 % de fibras, 10 % de células condutoras (vasos e elementos crivados) e 50 % de parênquima nos tecidos do colmo (LIESE, 1998). As fibras estão presentes nas bainhas dos feixes vasculares e em feixes isolados que compõem o tecido mecânico da planta com a função de dar resistência ao colmo (LIESE, 1985). As células condutoras são representadas pelos vasos do metaxilema e são responsáveis pelo transporte de água dentro do colmo. As células do parênquima envolvem os feixes fibrovasculares e contribuem para a estabilidade e flexibilidade do colmo de bambu, além de serem vitais para o armazenamento de substâncias principalmente as que são fontes de energia para os processos fisiológicos da planta (LIESE, 1985).

A estrutura anatômica do bambu influencia nas propriedades físicas e mecânicas do colmo e de particular importância é a influência da estrutura das camadas que formam as paredes celulares. As orientações das microfibrilas nas diversas camadas da parede celular resultam em uma estrutura de alta resistência à tração (PARAMESWARAN e LIESE, 1980). Segundo Parameswaran e Liese citados por Liese (1998), a parede secundária das fibras apresenta 8 ou mais camadas e as células do parênquima podem apresentar mais de 20 camadas em suas paredes. De acordo com Gritsch e Murphy (2005) as paredes celulares de fibras e parênquima desenvolvem-se basicamente em 3 estágios. O primeiro envolve divisões celulares de ambos os tipos de células, o segundo envolve o alongamento de fibras que ocorre durante o alongamento do internódio, enquanto as células do parênquima continuam a se dividir e no terceiro estágio evolve o alongamento dos dois tipos de células. Lybeer et al (2006) fizeram pesquisa sobre o espessamento da parede celular das fibras e do parênquima de espécies de bambu crescidas em clima temperado (*Phyllostachys viridiglaucescens*, *P. nigra*, *P. viridis*) e em clima tropical (*Gigantochloa levis* e *Dendrocalamus asper*).

Nas espécies do gênero *Phyllostachys* (clima temperado) analisaram os diâmetros e as espessuras das paredes das fibras próximas ao xilema e floema no lado mais interior, adjacente ao tecido vascular e no mais exterior, adjacente ao parênquima e as espessuras das paredes das células do parênquima situadas no centro da parede do colmo. nas espécies tropicais *D. asper* and *G. Levis*, observaram as espessuras e diâmetros das fibras do lado

adjacente do sistema vascular, xilema e floema e as espessuras e diâmetros das fibras dos feixes vasculares e dos feixes de fibras isolados em suas extremidades. As observações indicaram uma grande heterogeneidade na espessura da parede celular e no padrão de formação das camadas na parede de fibra dentro de um colmo. A Figura 7 está enfatizada a variação da espessura de camadas da parede da fibra amostradas de feixes localizados no interior do floema da espécie *P. viridiglaucescens* com 6 meses, 1 e 3 anos de idade, onde CML refere-se à lamela média da célula e Li ( $i=1$  a 11) correspondem às camadas da parede celular.

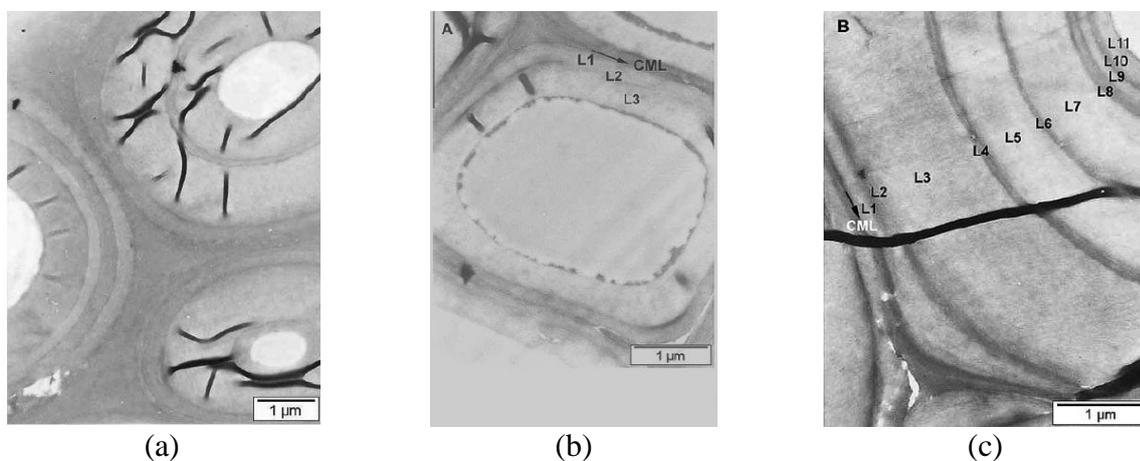


Figura 7 – Variação no número e espessura de camadas da parede de fibra de 6 meses (a) 1 mês (b) e 3 anos de idade (b)  
Fonte: Lybeer et al. (2006).

Os autores observaram que a estrutura das camadas das paredes celulares do parênquima é diferente da estrutura das camadas da parede das fibras, pois compreende várias camadas estreitas e não exibem espessuras uniformes, sendo indistintamente mais espessa ou mais fina. Foi constatado que as células parenquimáticas possuem paredes mais finas e lumes maiores quando comparadas com as fibras que apresentam paredes celulares espessas e lumes bem menores. Na Figura 8 estão mostradas as paredes das células do parênquima retiradas do tecido anatômico do colmo da espécie *P. viridiglaucescens* de 1 e 3 anos de idade. Observou-se que, a parede celular do parênquima de 1 ano é menos espessa do que a parede celular da célula do parênquima de 3 anos de idade em função do menor número de camadas constituintes das paredes celulares.

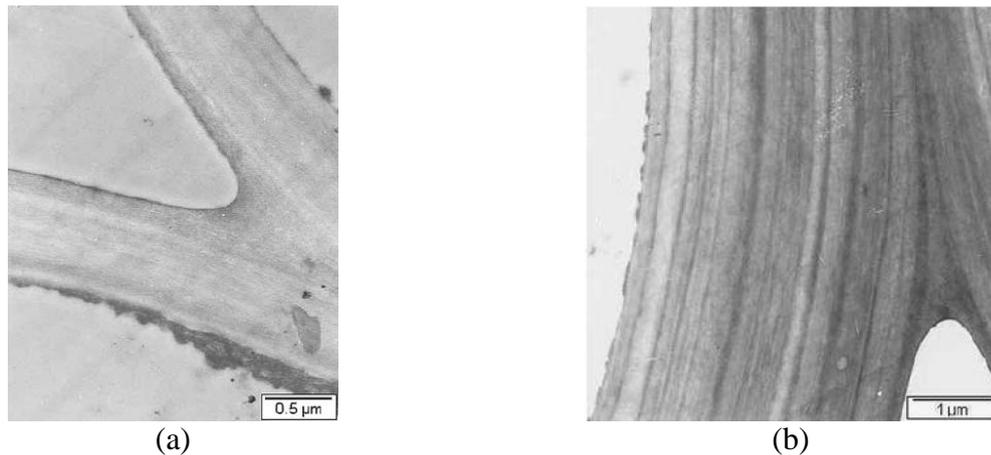


Figura 8 – Diferença da espessura das paredes celulares de células do parênquima de 1 (a) e 3 anos (b) de idade  
 Fonte: Lybeer et al. (2006).

Os autores concluíram que o espessamento das paredes das fibras e das células do parênquima ocorre ao longo de vários anos e que pode ocorrer maturação precoce ou tardia na parede celular. Colmos com mais de 3 anos podem apresentar paredes celulares finas e colmos mais novos podem apresentar paredes celulares espessas. Em pesquisa semelhante, Gritsch et al. (2005) caracterizaram a evolução da estrutura de camadas na parede da fibra de bambu da espécie *Dendrocalamus asper* e avaliaram, por mapeamento, a distribuição de fibras levando em consideração o número de camadas na parede celular e a posição que ocupavam no feixe vascular. Os autores relataram que as espessuras das paredes celulares aumentaram com a idade do colmo e que, em média, as paredes de fibras de colmos mais jovens apresentaram 2 camadas e as de colmos maduros 5 camadas, embora em colmos maduros tenha sido observado um grande número de fibras que apresentaram mais de 9 camadas. Segundo os autores, o principal período de deposição de camadas na parede secundária das fibras do floema ocorreu antes dos 6 meses de idade (Figura 9 (a)). Na Figura 9 (b), nota-se que a distribuição das fibras nos feixes do floema, com 1 ou 2 camadas, localizam-se próximas às células parenquimáticas, e que as com 3 ou 4 camadas estão posicionadas próximas ao floema, na cor amarelo escuro.

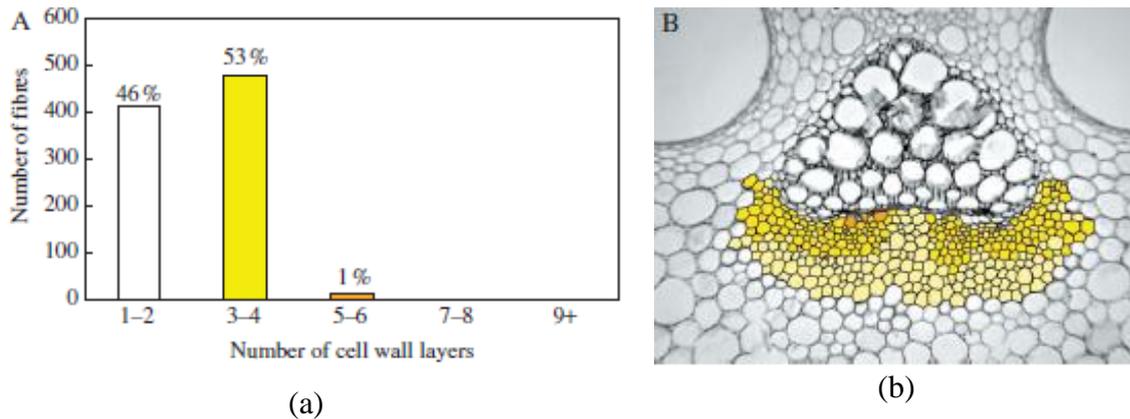


Figura 9 – Porcentagem do número de camadas depositadas nas paredes celulares das fibras (a) e mapa da distribuição das fibras no feixe de acordo com o número de camadas depositadas na parede celular  
Fonte: Gritsch et al. (2005).

Nas amostras de colmos com 1 ano de idade, 55% as fibras possuíam uma média de 5 ou 6 camadas (Figura 10 (a)), e a porcentagem de fibras com 7 ou 8 camadas aumentou drasticamente de 1% para 26% quando comparada à porcentagem relativa das amostras de menor idade. Na Figura 10 (b) as células com mais camadas localizam-se próximas aos elementos do floema.

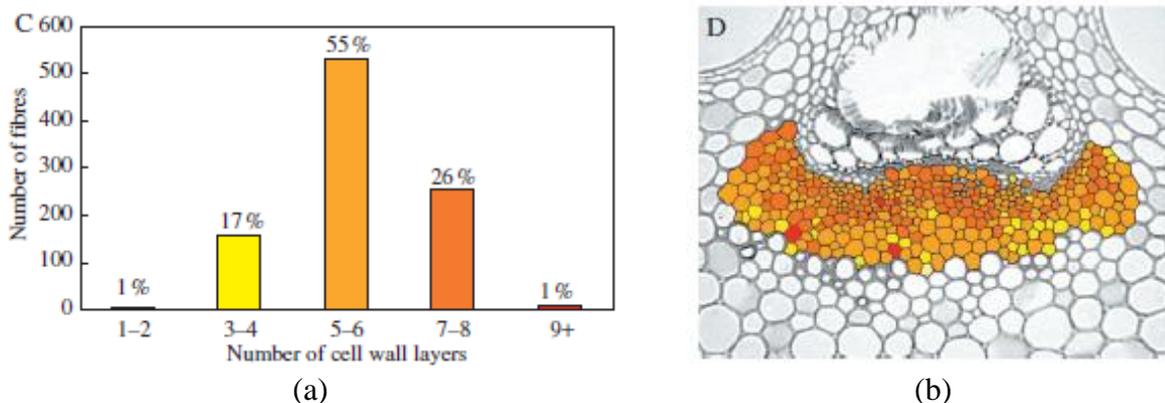


Figura 10 – Porcentagem do número de camadas das paredes das fibras (a) e mapa bidimensional (b) da distribuição das fibras dentro dos feixes do floema de acordo com o número de camadas nas paredes celulares das fibras  
Fonte: Gritsch et al. (2005).

No colmo de 3 anos, foi observado o aumento do número de fibras com 7 camadas ou mais (Figura 11 (a)). Em colmos maduros, a principal alteração foi em relação ao desenvolvimento das camadas nas paredes de fibras adjacentes ao floema e na periferia do feixe de fibras (Figura 11 (b)).

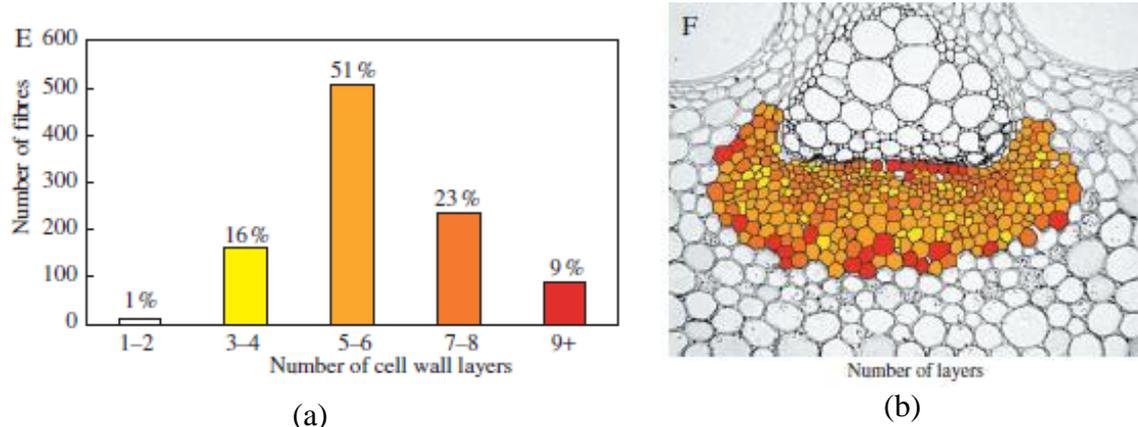


Figura 11 – Porcentagem do número de camadas das paredes celulares das fibras (a) e mapa da distribuição das fibras no feixe do floema, de acordo com o número de camadas na parede celular (b)  
Fonte: Gritsch et al. (2005).

Os autores concluíram que, as paredes das fibras dos feixes que circundam o floema, localizado na parte interna da parede do colmo de *D. asper*, desenvolveram-se rapidamente durante o primeiro ano de crescimento. Seis tipos diferentes de fibras foram caracterizados com base nas camadas que formaram a parede celular. Esses tipos de fibras foram encontrados em todos os estágios de desenvolvimento da célula. No estágio maduro (colmo com 3 anos de idade) a formação das multicamadas foi independente da espessura da parede celular, fibras de paredes mais finas apresentaram grande número de camadas na parede.

As estruturas celulares dos entrenós são arranjadas de forma paralela ao eixo do colmo e desviam-se orientando horizontalmente no diafragma. As fibras são mais curtas na região nodal, de modo que colmos se quebram facilmente nesta região. Dentro da região internodal, os vasos são orientados axialmente, sem interconexão e são cercados por 1 ou 2 camadas de células de parênquima lignificadas. Nos nós o metaxilema é caracterizado por um vaso ou mais vasos. Nos entrenós as células do parênquima são conectadas com os vasos através de pontuações semi-aureoladas (LIESE, 1998). As células do parênquima são na maior parte de parede fina e ligadas umas as outras por numerosas pontuações simples. As células parenquimáticas se caracterizam pelas formas alongadas e curtas intercaladas entre si. As alongadas possuem paredes mais espessas e se tornam-se lignificadas nos estágios iniciais de crescimento do colmo e as curtas possuem paredes mais finas (LWIN et al., 2000). De acordo com Liese (1985), as células do parênquima também são constituídas de sílica, que afetam principalmente o corte e as propriedades de polpação. No processo de envelhecimento do colmo, especialmente no período de maturação, ou seja, entre 3 e 4 anos, há modificação das células do parênquima e das fibras, que exibem espessamento de suas paredes celulares por

deposição adicional de subcamadas sobre as camadas da parede existentes e lignificação subsequente. O espessamento da parede é expresso por aumento da densidade e das propriedades de resistência

## 2.2 Propriedades físicas

O bambu apresenta características higroscópicas similares à madeira, ou seja, absorve umidade do ambiente. A variação de umidade abaixo do ponto de saturação das fibras (UPSF) é importante, pois provocam alterações na estrutura do bambu, como as contrações, que podem causar defeitos como empenos e rachaduras e, conseqüentemente, alterações na resistência mecânica (NOGUEIRA, 2008).

De acordo com Kishen et al. citados por Gyansah e Kwofie (2012), a UPSF está entre 20 e 22%. Hidalgo-López (2003) comenta que essa umidade oscila na faixa de 13 a 20% dependendo da espécie e que na condição verde o teor de umidade do colmo de bambu varia de 40 a 150%.

A densidade do bambu, que está diretamente relacionada com a estrutura anatômica do colmo, é influenciada pela maneira como os elementos anatômicos se arranjam e pelas espessuras de suas paredes celulares. De acordo com Hidalgo-López (2003), a massa específica aumenta ao longo da altura do colmo, situando-se em 0,547 g/cm<sup>3</sup> na região basal; 0,607 g/cm<sup>3</sup> à meia altura e 0,675g/cm<sup>3</sup> no topo. Segundo Bai (1996) e Liese (1998), a massa específica do bambu varia de 0,5 a 0.8 g/cm<sup>3</sup>. De acordo com Qisheng et al. (2001) a massa específica depende dos feixes vasculares, e que, como regra geral, a densidade do colmo aumenta da camada interna para a externa, da base para o topo e que na redião dos nós é maior do que nos entrenós.

A retração do bambu surge como consequência da evaporação da água no processo de secagem e varia em diferentes direções. Qisheng et al. (2001) concluíram que quando a umidade do colmo de *Phyllostachys pubescens* diminui 1%, a taxa média de retração é de 0,024% na direção longitudinal, 0,1822% na tangencial e 0,1890% na radial. A retração longitudinal é muito pequena, chegando a ser insignificante e as retrações radial e tangencial são bem semelhantes. Os autores garantem que numa mesma altura do colmo, a retração da camada externa da parede do colmo é diferente daquela da camada interna e, de acordo com Parameswaran e Liese (1980), a retração tangencial é mais elevada na camada externa da parede do que na interna.

Abd.Latif et al. *apud* Lee et al. (1994), estudaram a relação das características anatômicas sobre as propriedades físicas e mecânicas da espécie *B. blumeana* e concluíram que a idade e

a altura não afetaram significativamente o teor de umidade. No geral o teor de umidade na condição verde variou de 57% a 97% e nos colmos jovens o teor de umidade é maior do que em maduros. As contrações radiais e tangenciais variaram de 5,4% a 9,5% e 6,4% a 20,1%, respectivamente. Colmos mais velhos (3 anos) apresentaram-se dimensionalmente mais estáveis em comparação com os jovens (1 ano).

### 2.3 Propriedades mecânicas

O Bambu é um dos mais antigos materiais de construção que tem sido vastamente utilizado, especialmente em países asiáticos, em aplicações estruturais, como pontes, andaimes e moradia. Por ser um material natural está sujeito à variabilidade e à complexidade, pois é um material ortotrópico e tem propriedades mecânicas diferentes entre as direções longitudinal, radial e tangencial (AHMAD, 2000). De acordo com Qisheng et al. (2001) as propriedades físico-mecânicas do bambu são extremamente instáveis e, em certos aspectos, até mais instáveis do que as da madeira, pois à distribuição desigual dos feixes vasculares afeta a densidade, a retração e, a resistência em relação à altura e a posição que ocupam na parede e do colmo. Yu et al. (2008), estudaram as propriedades físicas e mecânicas do bambu Moso (*Phyllostachys pubescens*) com 4-6 anos de idade em diferentes posições da parede do colmo e em diferentes alturas. Retiraram duas porções (com 2 entrenós) nas alturas de 1,30 e 4,0 m a partir da base do colmo, que foram serradas longitudinalmente em ripas de 1,5 cm de largura. A casca de cada ripa foi removida, em seguida, cada ripa foi dividida igualmente em seis lâminas finas e nomeadas como camadas 1, 2, 3, 4, 5 e 6, sendo a 1ª, a camada interna e, a 6ª, a camada externa da parede da ripa. De todas as lâminas foram retirados corpos de prova para obtenção da densidade relativa (DR) e da resistência à tração. Os autores verificaram que as alturas e as camadas tiveram efeito significativo sobre a DR, que não houve interação entre elas e que diminuíram significativamente da camada mais externa (camada 6) para a mais interna, mais precisamente até a camada 4 que apresentou a mesma média estatística das demais camadas. As médias de densidade relativa em relação à altura apresentaram diferenças significativas, sendo a média da altura de 4.0 m ligeiramente maior do que a 1.3 m. (Figura 12 (a)). Vê-se nas Figuras 12 (b) e (c) os efeitos das camadas e das alturas sobre a retração tangencial e longitudinal. Os autores explicaram que as retrações tangencial e longitudinal dividiram-se em duas zonas compostas de 3 camadas cada, ou seja camadas externas (compostas pelas camadas 4, 5 e 6) e internas (compostas pelas camadas de 1, 2 e 3). A retração tangencial das camadas externas foi significativamente maior do que a das internas,

no entanto, para a retração longitudinal ocorreu o inverso, a retração nas camadas externas foi significativamente menor do que a das camadas internas.

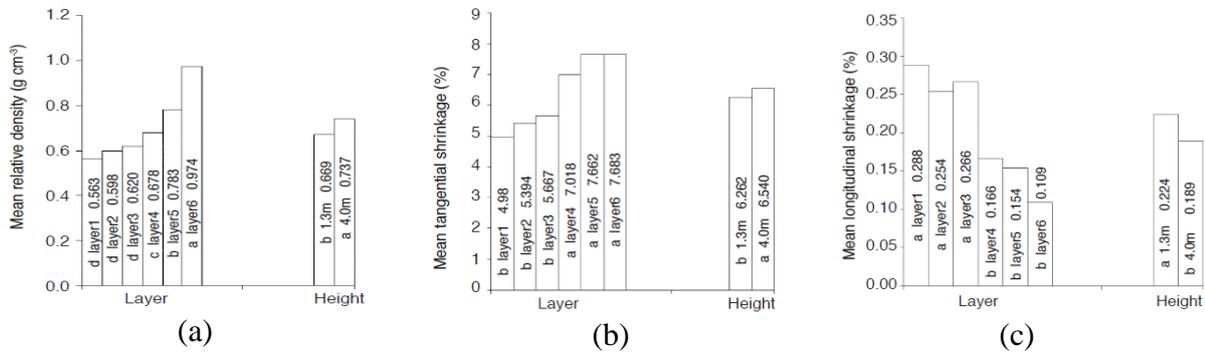


Figura 12 – Variações da densidade relativa (a) e das retrações tangencial (b) e longitudinal (c) de *Phyllostachys pubescens*  
Fonte: Yu et al. (2008).

As médias do módulo de elasticidade e da resistência à tração nas diferentes posições apresentaram grande variabilidade. Os autores verificaram que as camadas apresentaram diferenças significativas entre si no módulo de elasticidade, mas não houve diferença significativas entre as camadas 3 e 4, bem como entre as camadas 1 e 2. O mesmo ocorreu em relação a resistência à tração, que decresceu da camada externa para a camada interna. A Figura 13 refere-se aos gráficos do módulo de elasticidade na tração e a resistência à tração.

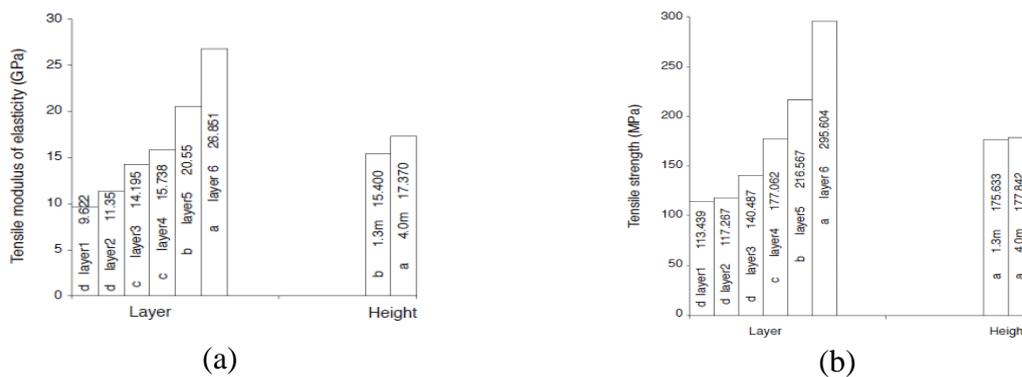


Figura 13 – Variação módulo de elasticidade (a) e da resistência (b) ambos no ensaio de tração de *Phyllostachys pubescens*  
Fonte: Yu et al. (2008).

Os autores concluíram que as camadas exerceram efeitos secundários sobre todas as propriedades físicas e mecânicas, que as alturas influenciaram todas as propriedades estudadas, exceto para resistência à tração. A densidade relativa, a retração tangencial, o módulo de elasticidade (MOE) e resistência à tração aumentam da camada interna em direção

à externa. No entanto, a retração longitudinal diminuiu da camada interna em direção à externa.

Obataya et al. (2007), compararam as propriedades de flexão de ripas de colmo de bambu com as de madeira de espécies nativas da Europa e Japão. Utilizaram 3 entrenós de 30 cm de comprimento e 15 cm de diâmetro, obtidos da meia-altura do colmo de bambu moso (*Phyllostachys pubescens*) de 3 anos de idade. Esses segmentos de colmo foram subdivididos em ripas de 8 mm de largura medida na direção tangencial (T) através de cortes paralelos efetuados no sentido longitudinal (L); 240 cm de comprimento e de espessura igual à da parede do colmo de onde foram retiradas, em torno de 8-9 mm medidos na direção radial (R) (Figura 14). Essas ripas foram subdivididas em lâminas, denominadas  $B_i$ ,  $i=0, 1, 2, 3$  e 12 representativas de camadas imaginárias da parede do colmo e todas elas foram ensaiadas à flexão sendo uma parte ensaiada com a carga aplicada na face mais interna da lâmina (tipo I) e a outra parte ensaiada com a carga aplicada na face mais externa (tipo II) tendo como referência a casca do colmo (Figura 15).

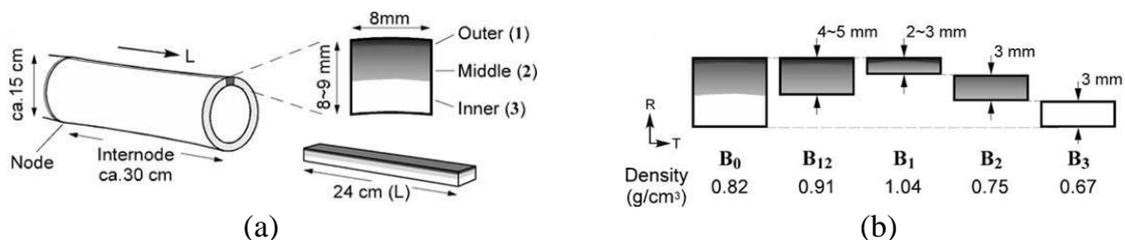


Figura 14 –Corpos de prova de representativos de camadas imaginárias da parede do colmo de *Phyllostachys pubescens*  
Fonte: Obataya et al. (2007).

No tipo I, a camada externa (mais densa) trabalhou na região tracionada e no tipo II essa camada trabalhou na região comprimida.

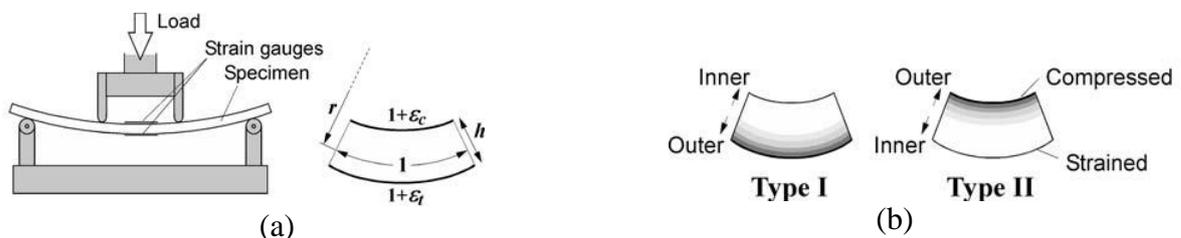


Figura 15 – Esquema do ensaio de flexão quatro-pontos (a) e do posicionamento da camada mais externa da lâmina na região tracionada (tipo I) (a) e na região comprimida (tipo II) (b)  
Fonte: Obataya et al. (2007).

Os autores calcularam o raio de curvatura ( $r$ ) a partir da deformação de tração ( $\epsilon_t > 0$ ) e da deformação de compressão ( $\epsilon_c < 0$ ) nas superfícies inferior e superior de cada amostra e da altura das vigas ( $h$ ) com a Eq (1) e o momento fletor crítico ( $M$ ), que depende da relação do momento de inércia ( $I$ ) pelo raio de curvatura chamada de curvatura relativa, pela Eq (2).

$$r = \frac{h}{(\epsilon_t - \epsilon_c)} \quad (1)$$

$$M = \frac{EI}{r} \quad (2)$$

As curvas para as camadas referentes às amostra B12 e B3, onde a curvatura relativa máxima ocorreu para as amostras do tipo I flexão são mostradas nas Figuras 16 (b) e (c).

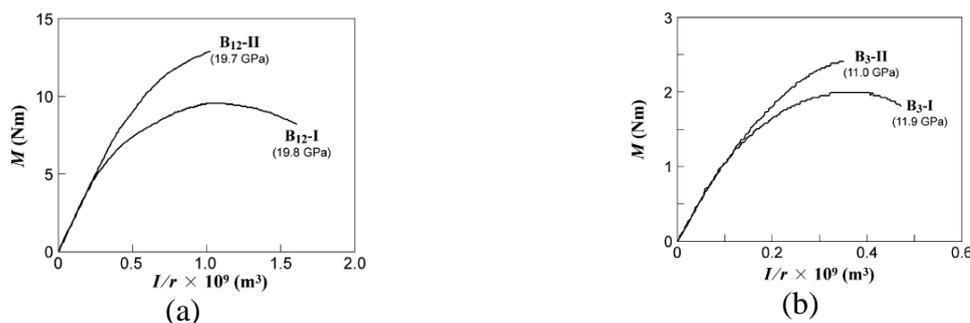


Figura 16 – Relação entre o momento ( $M$ ) e a curvatura relativa ( $I / r$ ) dos corpos de prova de bambu no ensaio de flexão quatro-pontos, nas camadas externa (a) e interna (b) da parede do colmo de bambu  
Fonte: Obataya et al. (2007).

A Figura 17 refere-se aos modelos de rupturas das ripas de bambu dos tipos I e II. Os autores explicaram que no tipo I, a resistência do colmo de bambu dependeu da resistência da coesão das fibras do esclerênquima da camada externa e não tanto da resistência à tração das próprias fibras. Por outro lado, a ruptura do tipo II na maioria das vezes, partiu da fenda na membrana terminal da camada interna, logo abaixo do ponto de carga, maximizando o momento de flexão e a tensão de cisalhamento que juntas causaram a ruptura frágil na camada interna do tipo II.



Figura 17 – Modos de ruptura de ripas de bambu de acordo com os tipos I (a) e II (b)  
 Fonte: Obataya et al. (2007).

Os autores concluíram que a combinação da região rica em fibra da parede do colmo (camada externa) com a região que denominaram de compressível, rica em células do parênquima (camada interna), foi responsável pela ductilidade da flexão das ripas de bambu. Na comparação do bambu com algumas madeiras, nenhuma diferença foi observada e os autores concluíram que o colmo de bambu não é tão flexível elasticamente.

Low et al. (2006), estudaram algumas propriedades de resistência utilizando colmos de bambu jovens (1 ano de idade) e maduros (5 anos de idade) da espécie *Sinocalamus affinis*. Os autores relataram que o bambu jovem apresentou melhor resistência à flexão e ao impacto medida no pêndulo de Charpy e que os colmos de bambu mostraram variação gradual de dureza da região externa para a região interna. A parede do colmo foi dividida em 3 camadas, ou seja, externa, intermediária e interna, sendo a camada externa a que apresentou maior resistência, seguida da intermediária e da interna. Os autores efetuaram o ensaio de flexão quatro-pontos em corpos de prova que possuíam uma fina fissura de ponta afilada e observaram a propagação dessa fissura com o aumento da carga. A Figura 18 (a) refere-se à curva carga-deslocamento do bambu durante o carregamento com a indicação dos pontos A, B e C que se referem aos pontos vinculados a 3 estágios da fissura provocada antes do ensaio mecânico. Vê-se na Figura 18 (b) a configuração inicial da fina fissura antes do carregamento da carga. Esta configuração permaneceu praticamente inalterada durante carregamento da carga nos pontos A e B, exceto por um ligeiro alargamento da fissura no ponto B (Figura 18 (c)). No ponto C a ruptura desviou-se da fissura inicial e migrou tangenciando um feixe de fibras, como se provocasse o descolamento dos tecidos anatômicos, como indicado pelas setas da Figura 18 (d).

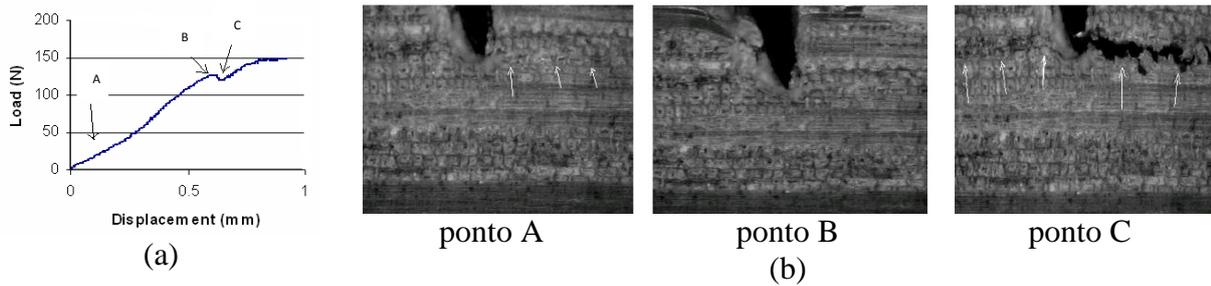


Figura 18 – Curva indicativa do comportamento elasto-plástico do bambu (a) com pontos característicos relacionados aos estágios de ruptura (b)  
Fonte: Low et al. (2006).

Nas rupturas por flexão e impacto, os autores observaram que os feixes de fibras continuaram a suportar a carga até ocorrerem sucessivas rupturas em camadas. As rupturas foram propagadas de forma tortuosa, desviando-se das fibras e provocando a descolagem interfacial das fibras do tecido parenquimático. Na Figura 19 (a) o descolamento das camadas ocorrido no ensaio de flexão e o cisalhamento no tecido anatômico da região tracionada. A Figura 19 (b) refere-se à ruptura provocada pelo ensaio de resistência ao impacto.

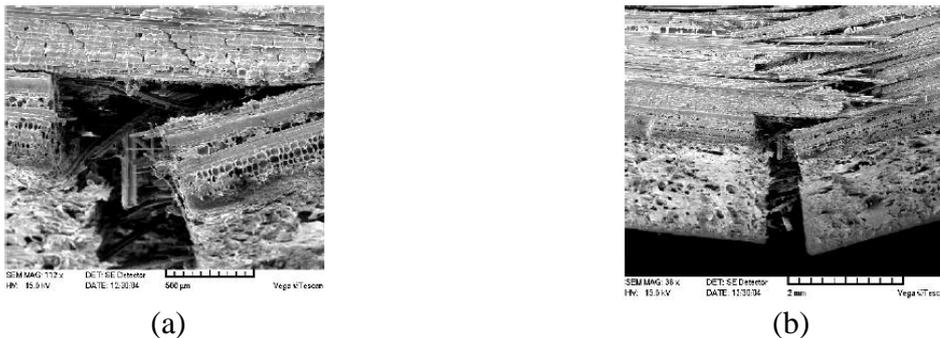


Figura 19 – Micrografias geradas através do MEV mostrando as rupturas provocadas nos corpos de prova pelos ensaios de flexão (a) e de impacto (b)  
Fonte: Low et al. (2006).

Abd.Latif et al. *apud* Lee et al. (1994), estudaram a relação das características anatômicas com as propriedades mecânicas da espécie *B.blumeana* e em relação à idade e altura do colmo. Neste estudo, a maioria das propriedades mecânicas variou significativamente com a idade e ao longo da altura no colmo. As resistências ao cisalhamento, compressão paralela às fibras e flexão no limite de proporcionalidade, aumentaram gradualmente com o aumento da idade e da altura. As resistências ao cisalhamento, compressão paralela às fibras e flexão se correlacionaram com a densidade e com o teor de umidade.

Gonzalez-Salcedo (2001) relata que os primeiros ensaios mecânicos com bambu foram realizados nos Estados Unidos por Chou numa pesquisa que incluiu 220 repetições cujas médias dos resultados estão apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 – Propriedades mecânicas do bambu

ENSAIO	RESISTÊNCIA (MPa)
Flexão	93.5
Tração	98.6
Compressão	38.7
Cisalhamento	8.0

Fonte: Chou *apud* Gonzalez-Salcedo (2001) adaptado

Bahari e Ahmad (2011) estudaram a classificação dos modos de ruptura em ensaios de flexão e cisalhamento de lâminas de bambu da espécie *Gigantochloa scortechinii*. Os colmos foram transformados em ripas que foram tratadas e secas em estufa. As ripas foram transformadas em lâminas retiradas das regiões internodal e nodal, as quais foram submetidas a testes mecânicos baseados na norma ASTM D 143-94. No ensaio de flexão a carga foi aplicada na direção radial, ou seja, a camada externa (casca) da ripa foi posicionada para receber o esforço de compressão durante o carregamento e, para o teste de cisalhamento, a carga foi aplicada paralelamente à grã e na direção radial. Microscopicamente, as rupturas foram observadas na seção transversal e as imagens foram capturadas por uma câmera digital da marca Leica DC300 e processadas usando um software de morfologia. Os tipos de ruptura dos corpos de prova de flexão estão mostrados na Figura 20.



Figura 20 – Modos de ruptura das lâminas de bambu da região internodal (a) e da região nodal, onde BL indica o ponto de aplicação da carga, SR fissuras padrão da tração e ES cisalhamento extensivo.

Fonte: Bahari e Ahamad (2011).

Microscopicamente, os autores observaram que as rupturas ocorreram em regiões de tecido parenquimático passando pelos feixes vasculares. A Figura 21 refere-se às imagens do tecido anatômico obtidas após a ruptura de lâminas no ensaio de flexão.

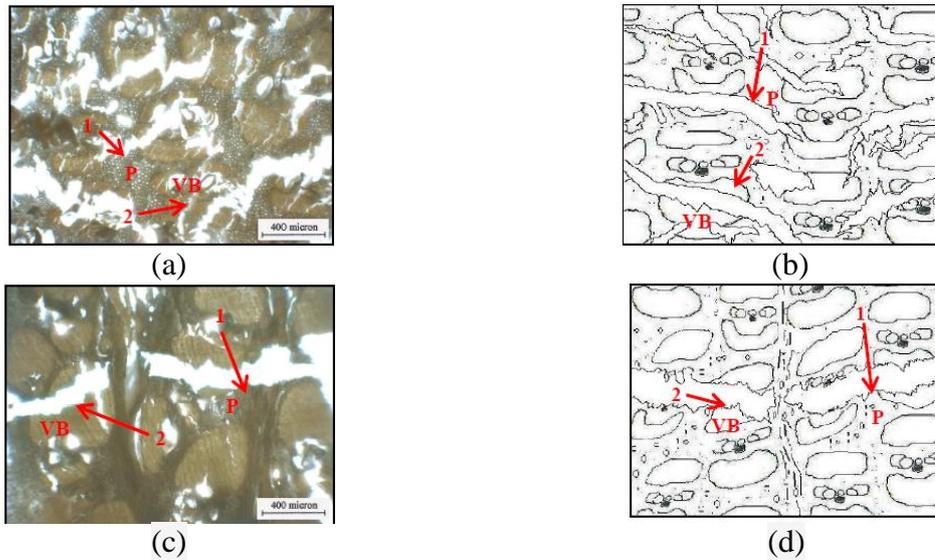


Figura 21 – Amostras retiradas de lâminas internodal (a) e (b) e nodal (c) e (d) após o ensaio de flexão

Fonte: Bahari e Ahamd (2001).

A média de resistência à flexão foi de 83,52 N/mm<sup>2</sup> para os corpos de prova retirados da porção internodal do colmo e 70,82 N/mm<sup>2</sup> para os corpos de prova retirados da porção nodal. O valor médio da tensão de cisalhamento para os corpos de prova com clivagem total, retirados da região internodal do colmo foi de 5,94 N/mm<sup>2</sup> e para os corpos de prova retirados da porção nodal do colmo com ruptura sem clivagem total a média foi de 4,96 N/mm<sup>2</sup> (Figura 22).



Figura 22 – Resistências à flexão (a) e ao cisalhamento (b)

Fonte: Bahari e Ahamad (2011).

Os autores afirmaram que a estrutura anatômica da maioria das fibras, caracterizada por uma lamela espessa na parede secundária, influencia as propriedades de resistência. Essa estrutura também oferece maior resistência dos feixes vasculares em relação ao tecido parenquimático, onde se iniciaram as rupturas. O tecido do colmo é composto por aproximadamente 50% de células do parênquima e as rupturas são facilitadas nessa região. Nos nós os feixes vasculares

são orientados de forma aleatória e, as fibras são mais curtas e não suportam muita tensão. Esta razão influenciou a diferença entre o comportamento das rupturas. Os tipos de ruptura para o cisalhamento são apresentados na Figura 23.



Figura 23 – Tipos de rupturas provocadas pelo ensaio de resistência ao cisalhamento radial em lâminas internodais (a) e com nó na área de cisalhamento (b)  
Fonte: Bahari e Ahamad (2011).

No teste de cisalhamento os corpos de prova internodais exibiram clivagem homogênea e, microscopicamente, os autores observaram que as rupturas ocorreram no tecido do parênquima nos corpos de prova internodais (Figuras 24 (a) e (b)) e nos corpos de prova com nós as rupturas ocorreram de forma tortuosa, também no tecido parenquimático, tendendo a contornar os feixes de fibras existentes no plano de cisalhamento (Figuras 24 (c) e (d)).

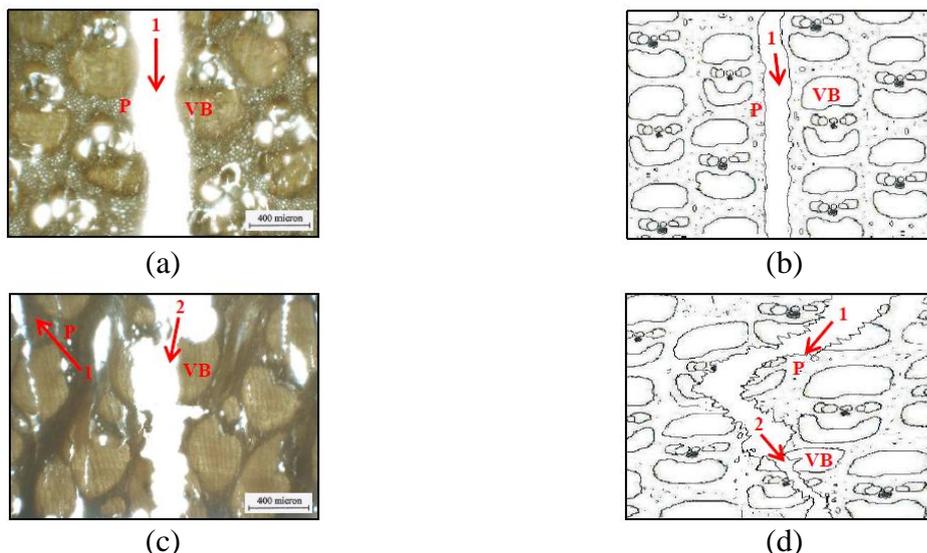


Figura 24 – Linhas de rupturas ao cisalhamento na região internodal (a) e (b) e nodal (c) e (d)  
Fonte: Bahari e Ahamad (2011).

Os autores concluíram que as diferenças dos tipos de ruptura classificados, bem como as propriedades de resistência mecânica de lamina de bambu foram influenciadas pelo

comportamento dos feixes fibrovasculares que diferem nas regiões nodais e internodais dos colmos de bambu.

Ghavami (2005) investigou a resistência ao cisalhamento interlaminar de corpos de prova retirados de três diferentes alturas: base, meio e topo do colmo da espécie *Guadua angustifolia*, neste estudo observou que a resistência aumentou da base para o topo, sendo que na média os corpos de prova internodais resistiram 2,42 MPa contra 2,11 MPa para os nodais. Na base a resistência foi de 2,20 MPa para os corpos de prova internodal e 1,67 MPa nodal, respectivamente. No centro 1,43 nodal e 2,27 internodal e topo 2,11 nodal e 2,41 internodal. De acordo com Janssen (1981), o entrenó é mais resistente ao cisalhamento que o nó, pois nos entrenós as fibras são axiais e nos nós não há segmento contínuo das fibras, especialmente, por haver a presença de vasos transversais que estão conectados ao diafragma do colmo.

Li (2004) estudou a resistência e o módulo de elasticidade na compressão paralela e perpendicular às fibras em 3 alturas diferentes de colmos de 1, 3 e 5 anos de idade e concluiu que essas propriedades foram significativamente mais elevadas na direção paralela às fibras e que as variabilidades à compressão perpendicular às fibras foram maiores do que as das compressão paralela (Figura 25). As propriedades aumentaram com o aumento da idade do colmo. A menor média de resistência à compressão perpendicular foi de 16,1 MPa nos colmos de 1 ano e a maior média foi de 34,3 MPa nos colmos de 5 anos de idade e os valores componentes dessas médias foram sempre maiores na posição do topo do colmo. Não houve diferença significativa entre a base e a porção média. O mesmo comportamento ocorreu com o módulo de elasticidade perpendicular e também com as mesmas propriedades medidas na compressão paralelas.

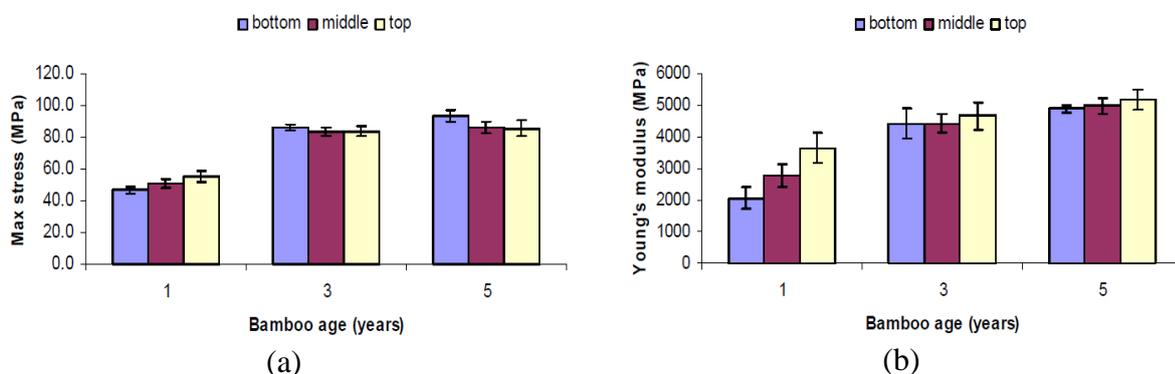


Figura 25 – Tensão máxima no limite de resistência (a) e módulo de elasticidade (b) na compressão perpendicular (b) e as mesmas propriedades na direção paralela às fibras (a, b) de bambu  
Fonte: Li (2004).

Esses resultados mostraram que o bambu é um material que tem propriedades direcionais e que a maior variabilidade na compressão perpendicular é devida à fraca ligação entre as fibras, e conseqüentes rupturas aleatórias principalmente na direção tangencial.

Wei, Jiang e Zhang (2011) verificaram o desempenho na flexão de vigas de bambu laminado colado para fins estruturais testando 10 vigas de 30 mm de espessura, 100 mm de altura e 2000 mm de comprimento. Observaram 4 tipos típicos de ruptura nas vigas de bambu, as quais foram denominadas de ruptura frágil da fibra inferior, por compressão na parte superior da viga, estratificada e ruptura oblíqua que sempre se inicia na borda tracionada. Os 4 tipos de ruptura que encontraram nos ensaios de flexão de vigas laminadas coladas de bambu estão apresentadas na Figura 26.



Figura 26 – Ruptura frágil (a), por compressão (b), estratificada (c) e oblíqua (d)  
Fonte: Wei et. al (2011).

Os autores descreveram o tipo de ruptura frágil como sendo decorrente de defeito da lâmina da borda tracionada, seja de fabricação ou natural como, por exemplo, um nó; que o tipo de ruptura por compressão ocorreu na borda comprimida; que a ruptura estratificada foi causada pela tensão de normal de tração na seção de maior momento e que a ruptura oblíqua, bastante frequente, se iniciou na região do momento constante e migrou entre lâminas como consequência do cisalhamento no plano de cola.

## 2.4 Molhabilidade

Segundo Moita Neto (2009), uma gota de água apresenta diferentes formatos dependendo da superfície onde se espalha, pois o modo como o volume de água de uma gota se acomoda depende da interação entre a água e a superfície do material em que foi depositada. Essa interação é expressa pelo ângulo de contato entre a água e a superfície e que varia de 0 a 180°. Os limites inferior e superior indicam respectivamente máxima afinidade química entre a superfície e o líquido uma vez que o espalhamento do líquido se dá por completo no sólido, e ausência de qualquer interação com a superfície. Pode-se considerar que a superfície está

molhada pelo líquido quando o ângulo de contato estiver abaixo de  $90^\circ$ . Segundo Collett (1972), o ângulo de contacto é o indicador da afinidade de um líquido para um sólido e de acordo com Marra (1980), a formação da ligação adesiva no material lenhoso compreende as fases do fluxo, transferência, penetração, umedecimento e solidificação. Sernek et al. (1999) afirmam que a penetração do adesivo nas células da madeira tem forte influência na resistência da ligação e Lybeer (2006) explica que a penetração do adesivo no bambu pode ser influenciada pela anatomia da parede do colmo, composição química, propriedades físicas e mecânicas. Sernek et al., (1999) estudaram a penetração do adesivo ureia-formaldeído na madeira usando um microscópio de fluorescência e concluíram que o teor de umidade exerce influência significativa na penetração desse adesivo. Este estudo também revelou que houve diferença significativa de penetração do adesivo nas direções radial e tangencial sendo na direção tangencial maior que na direção radial. Li, (2004) mediu o ângulo de contacto da gota do adesivo ureia-formaldeído na epiderme e nas camadas interna, externa e central da parede do colmo. Amostras de bambu foram embebidas em água destilada durante 4 horas e delas foram retirados cortes de  $60\ \mu\text{m}$  de espessura de cada camada no micrótomo de deslize. Os cortes foram montados em lâminas de vidro e secos numa estufa com temperatura de  $40\ ^\circ\text{C}$  durante 24 horas antes da medição do ângulo de contacto. Uma pequena gota de líquido UF resina (0,1 ml) foi pingada na superfície de cada amostra e imagens das formas da gota de resina foram capturadas a cada 30 s por uma câmara SPOT digital ligada com um microscópio de luz e a um computador. Os resultados mostraram que com o aumento do tempo após o gotejamento da resina na superfície de cada amostra, o ângulo de contato tornava-se menor até estabilizar-se num equilíbrio. Na epiderme ocorreu o maior angulo de contato, a camada interior apresentou a menor alteração no ângulo de contato no intervalo de 210 s e a camada central foi a que apresentou menor ângulo de contato. Os ângulos de contato nas diferentes camadas da parede do colmo foram estatisticamente diferentes entre si e estão apresentados na Figura 27.

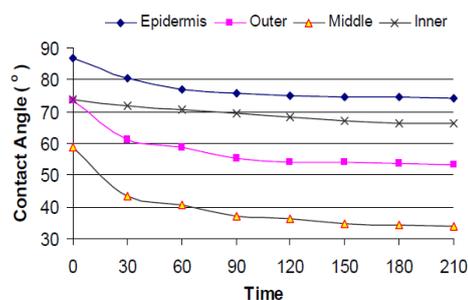


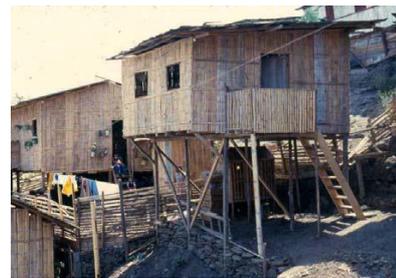
Figura 27 – Ângulo de contato da ureia-formaldeído na superfície de diferentes camadas da parede do colmo medidos ao longo do tempo  
Fonte: Li (2004).

## 2.5 Aplicações do bambu no meio social e na indústria

O bambu tem sido utilizado vastamente por países em desenvolvimento como material essencial de construção para população carente. Desde 1973 uma fundação denominada Hogar de Cristo, com sede no Equador, desenvolve um programa de moradia denominado “Vivendas Hogar de Cristo (VHC). O programa teve como objetivo suprir a demanda de moradia para a população que vivia em condições de extrema miséria e promover o valor de um lar (VRIES, 2002). O objetivo do programa de moradia consiste na venda de casas pré-fabricadas (Figura 28), incluindo manual de construção. A casa de 23,52 m<sup>2</sup> é modular com estrutura de madeira e vedada com bambu. Outras experiências utilizando o bambu como material para construção de casas populares foram encontradas na Costa Rica, Colômbia, Cuba e Brasil.



(a)



(b)

Figura 28 – Painel em pré-fabricado (a) destinado à casa modular (b) do programa Vivendas Hogar de Cristo

Fotos: Gutierrez (a) e Moran (b)

Fonte: Vries (2002)

O processamento mecânico do colmo possibilita elevar o número de aplicações da planta, pois com o avanço tecnológico e industrial, foi possível agregar valor a um novo produto fabricado com uma antiga matéria prima. São inúmeras as aplicações bambu e dos produtos à base de bambu, especialmente na área da arquitetura e engenharia como piso, móveis, esquadrias e até mesmo em grandes estruturas.

Yu (2007) fez uma avaliação do contexto industrial envolvendo o bambu como matéria prima e mencionou que historicamente o bambu não foi potencialmente explorado devido à sua forma irregular, à heterogeneidade de sua estrutura e à variabilidade de suas propriedades, fatores ainda dificultam o beneficiamento primário e secundário executados em máquinas padronizadas. O autor afirma que a conotação de “material para os pobres” é decorrente do processamento manual, o qual é impreciso e subdesenvolvido. Yu (2007) afirma que, no setor

industrial normalmente divide-se o colmo do bambu em unidades menores, as quais, através da aplicação de adesivos se transformam em produtos maiores denominados produtos à base de bambu. Essas unidades menores do colmo podem ser grandes como ripas ou taliscas, pequenas aparas, cavacos, partículas ou fibras. A partir disso, podem ser gerados produtos diversificados denominados de compósitos de bambu, destinados especialmente para o setor da construção, como por exemplo, o compensado de bambu (HIDALGO-LÓPEZ, 2003). Kai e Xuhe (2006) afirmam que os produtos à base de bambu apresentam as vantagens de poder ter grandes dimensões estabilidade dimensional e alta resistência mecânica e, por outro lado, Yu (2007) afirma que devido à desagregação dos colmos, perdem-se muitas das potencialidades da matéria prima. Existem muitos tipos de painéis à base bambu e mais 20 deles são produzidos em escala industrial, Jiang et al. (2002) explicam que os painéis à base de bambu são produzidos basicamente com ripas lascas ou cavacos finos e partículas. O processamento mecânico de transformação do colmo em ripas e os dois tipos de ripas utilizadas em painéis podem ser observados na Figura 29.

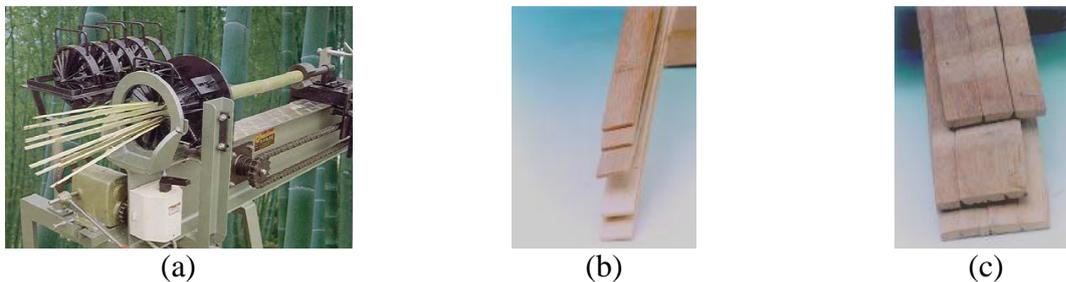


Figura 29 – Colmo sendo rachado em ripas (a), lâminas serradas ou desenroladas (b) e painéis colados (c)

Fonte: Yu (2007) (a) Qisheng et al. (2003) (b) e (c).

Os compósitos manufacturados com ripas incluem os compensados de bambu, bambu laminado colado e piso. Segundo Jiang et al. (2002), no processo de produção do compensado as ripas prensadas são posicionadas para o encolamento e submetidas à alta pressão e elevada temperatura. Bai (1996) descreve que no processo de fabricação do compensado com ripas serradas, o colmo de bambu é primeiro seccionado transversalmente nos comprimentos desejados. As camadas internas e externas são retiradas com equipamento especialmente projetado para esse fim. As ripas originadas seguem para um tanque de cozimento com temperatura acima de 100°C e posteriormente são tratadas, secas e distribuídas para receberem o adesivo e serem prensadas a quente. Na China são amplamente utilizados em caminhões e ônibus como também em painéis modulares.

Segundo Zang apud Jiang et al. (2002) a densidade do painel de compensado de bambu é de 0,8-0,85 g/cm<sup>3</sup>, o módulo de ruptura paralelo às fibras é superior a 90 MPa e o perpendicular às fibras é superior a 40 MPa. O rendimento do bambu na produção de compensado é de 30-35% mas o investimento é mais alto do que o necessário para fabricação de outros painéis à base de bambu.

Outros tipos de painéis à base de bambu que são produzidos com ripas serradas ou laminadas como, por exemplo, o laminated bamboo lumber (LBL), que segundo Rittironk (2009), é um tipo de material engenheirado e utilizado para diversos fins. O autor relata que nos Estados Unidos o LBL é atualmente usado como pisos, bancadas, fôrmas para moldagem, degraus e corrimões. De acordo com Lee e Lui (2003), o piso de bambu é um painel composto por lâminas serradas retiradas de colmos maduros. Os colmos de bambu são seccionados nos sentidos transversal e longitudinal para produção das ripas, sendo os nós e a camada externa removidos nessa fase. Em seguida, as ripas são fervidas em solução de ácido bórico ou cal para redução do amido e do açúcar, aplainadas, secas até atingirem o teor de umidade de 8 a 10% e coladas sob pressão a quente para originar o piso de bambu sem acabamento que seguem para fase final, onde são lixados em ambos os lados e em suas duas bordas são feitos o conjunto macho/fêmea. Finalmente, o painel é revestido com a laca curada por (UV) ultravioleta.

De acordo com Jiang et al. (2002), a técnica e a qualidade de produção de piso já eram extremamente controladas. O investimento é baixo em relação à matéria prima, aproximadamente 20%, sendo o piso de bambu e o bambu laminado colado, produtos de alto valor agregado e de bom prospecto no mercado. Segundo Moizés (2007), os painéis de Bambu Laminado Colado (BLC) possuem boas características estruturais e podem ser classificados como materiais de alta versatilidade e resistência.

Nugroho e Ando (2001), desenvolveram experimento visando usar esteira de bambu pré-prensada a quente para a produção de LBL (laminated bamboo lumber), segundo um processo similar ao usado na manufatura do LVL (laminated veneer lumber). Os autores produziram 6 LBL de 4 camadas de esteira de bambu unidas com adesivo a base de resorcinol, envolvendo 3 combinações de colagem em relação às camadas interna e externa da parede do colmo (externa – interna, externa – externa e interna - interna) que foram denominadas como tipos I, II, e III respectivamente. No teste de flexão a carga foi aplicada em duas posições do LBL; sendo a “flat”, com a carga aplicada perpendicularmente ao plano das lâminas e a “Edge” com a carga aplicada paralelamente ao plano das lâminas. O LBL produzido foi comparado ao LVL convencional. Os resultados indicaram que não houve nenhuma diferença significativa

entre as propriedades físicas e mecânicas dos 3 tipos de LBL. A viga tipo II (externa-externa) forneceu melhores propriedades na resistência à flexão em relação aos outros 2 tipos, mas apresentou a menor resistência na linha de cola na camada central da estrutura da viga, a melhor resistência na linha de cola central foi na viga tipo III (interna-interna). Todas as vigas que tiveram a carga aplicada paralela às lâminas (*edge*) obtiveram melhores propriedades de resistência à flexão, do que as vigas ensaiadas com a carga aplicada perpendicular às lâminas (*flat*).

As indústrias voltadas ao processamento de bambu são consideradas estratégicas para o desenvolvimento de economias locais, em especial para os países tropicais em desenvolvimento onde este recurso florestal é facilmente encontrado e com potencial para ser industrializado e originar produtos que podem perfeitamente substituir a madeira. O autor afirma, entretanto, que com o processamento mecânico, o bambu perde parte da qualidade estrutural natural do colmo (YU, 2007).

## 2.6 Arquitetura com bambu

O uso do bambu está presente na cultura de praticamente todos os povos primitivos, de todos os continentes. De acordo com Hidalgo-López, (2003), o homem da pré-história utilizou o bambu para a construção de sua primeira cabana. Desde os primórdios da humanidade, o homem, para se proteger das intempéries e dos perigos, busca materiais disponíveis nos recursos naturais para uso em suas construções, sendo o bambu um destes materiais. Segundo o autor os hindus desenvolveram técnicas de aplicação do bambu na construção de domus (Figura 30 (a)). Os famosos domus da Índia foram inicialmente desenvolvidos pelas castas mais pobres, que eram os “*chudras*” a quem não era permitido o uso de outro material diferente do bambu para construir suas habitações, já que as castas mais altas usavam a pedra e as intermediárias usavam a madeira. Hidalgo-López (2003), afirma que a estrutura do Taj-Mahal foi desenvolvida em bambu pelos *chudras*, depois foram construídas em madeira e finalmente em pedra (Figura 30 (b)).



Figura 30 – Domus segundo a tecnologia estrutural desenvolvida na Índia (a) para grandes obras como a do Taj-Mahal (b)  
Fonte: Hidalgo-López (2003).

O papel do bambu no setor de construção tem sido essencial nos lugares onde ele cresce naturalmente. Sua resistência, flexibilidade e versatilidade o fazem ser um material com capacidade de ser utilizado estruturalmente, mas precisa ser quimicamente tratado por que sem o tratamento o tempo de utilização é curto. Com as inovações tecnológicas aplicadas ao bambu é possível utilizá-lo de forma durável e com melhor aparência e isso o torna comercialmente aceitável. Na América Latina, especialmente na Colômbia, há diferentes sistemas construtivos desenvolvidos para o bambu e direcionados para famílias de baixa, média e alta renda (VRIES, 2002).

Programas habitacionais que utilizam bambu como material de construção em alguns países como a Colômbia, Equador e Costa Rica, são bastante desenvolvidos e aceitos pela população. O Projeto Malabar é um dos exemplos, onde se buscou construir com valores sociais, culturais e utilizando materiais regionais. Teixeira (2006) explica que o projeto é do Engenheiro Civil Jorge Arcila e foi executado a partir dos anos 70 onde o material estrutural aplicado nas obras foi basicamente colmos bambu da espécie *Guadua angustifolia* combinado com outros materiais. A autora descreve que cada unidade de habitação possui sala de estar, quarto, cozinha e banheiro e que as colunas principais da estrutura da casa são apoiadas em fundações de concretos. Os cortes esquemáticos do projeto das habitações sociais e a obra executada podem ser observados na Figura 31.



Figura 31 – Corte esquemático do projeto arquitetônico de habitações sociais (a) e unidades executadas num conjunto habitacional (b)  
Fonte: Teixeira (2006)

Segundo Yu (2007), o bambu como um material natural tem grande versatilidade porque pode ser transformado em produtos engenheirados, mas também pode ser utilizado como um material natural que é de baixo custo e de fácil obtenção. Arquitetos e designers de países sul-americanos como a Colômbia e Equador têm construído casas com aplicação estrutural de colmos de bambu desde os anos 70. O gênero *Guadua* é dominante na América Latina atingindo até 30 m de comprimento e diâmetro de até 20 cm e tem sido amplamente usado em edificações e pontes. Uma das maiores dificuldades encontradas em relação à execução de projetos arquitetônicos é que o material é cônico e de difícil ligação entre colmos. Para maior estabilidade estrutural o arquiteto colombiano Simón Velez desenvolveu um sistema de construções no qual as extremidades dos colmos são preenchidas com concreto para facilitar a inserção de elementos metálicos responsáveis pela ligação entre colmos. Esse procedimento visa agregar resistência e evitar as fissuras de cisalhamento características do material e, assim, permitir a realização de construções impressionantes de grandes vãos livres. O arquiteto tornou-se famoso depois de projetar e construir o pavilhão da Ong ambiental ZERI (Zero Emissions Research Initiatives) utilizando o bambu como material primordial da obra executada na feira Expo Hannover de 2000. Segundo Salas-Delgado (2006), foi construído um protótipo desse pavilhão na cidade de Manizales na Colômbia e submetido a provas estruturais por engenheiros da universidade de Stutgard. A exigência dos ensaios ocorreu porque o bambu (*Guadua angustifolia*) e a madeira (aliso) eram os materiais essenciais no projeto do pavilhão e na época somente o aço e o concreto eram admitidos como materiais estruturais na Alemanha. Para obter-se a licença de construção da Alemanha, foi realizada uma série de provas de resistência mecânica do protótipo dos elementos estruturais e das conexões. Somente após ter sido comprovada a eficiência do material e das conexões é que a obra pôde ser executada no país. A estrutura circular de 40 m de diâmetro com um beiral de sete metros em balanço foi construída com colmos de bambu e com toras de madeira. A área total de construção do pavilhão foi de 2.150 m<sup>2</sup> sendo 1.650 m<sup>2</sup> no térreo e 500 m<sup>2</sup> no primeiro andar. Foram utilizadas 2 tipos de ligações para conectar os colmos uns aos outros (Figura 32). Essas ligações foram testadas na universidade de Stuttgart e os resultados foram aplicados à execução do pavilhão (DETHIER, 2000).

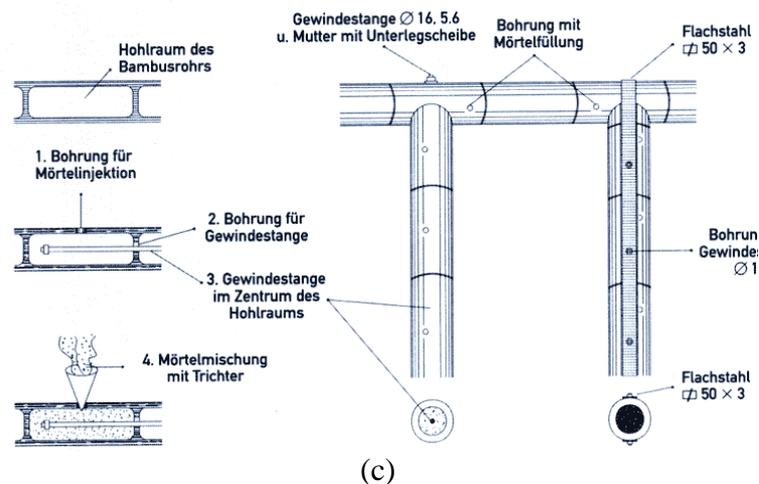


Figura 32 – Esquemas das ligações entre colmos  
 Fonte: Dethier et al. (2000).

De acordo com Terranova et al. (2009) a obra arquitetônica denominada “the great bamboo wall” é de autoria do arquiteto Kengo Kuma que foi escolhido pelo governo chinês convidou 10 arquitetos asiáticos para projetar casas de hóspedes destinadas a diplomatas em uma área próxima da Grande Muralha da China. O arquiteto optou por não alterar a topografia do local e por utilizar materiais produzidos no local e de simples reposição. O projeto linear da obra remete ao da muralha da China. A casa de 720 m<sup>2</sup> teve o bambu usado como brises deslizantes (Figura 33). Terranova et al (2009) explicam que na aplicação estrutural do bambu como pilares, os diafragmas dos colmos foram removidos e uma barra de aço foi introduzida ao longo de todo comprimento e os colmos foram preenchidos com concreto. De acordo com Rittironk (2009), os colmos foram cuidadosamente selecionados para serem aplicados como molduras nas fachadas e não como componentes estruturais naturais, pois foram modificados com o preenchimento do volume interno pelo cimento.



(a)



(b)

Figura 33 – Fachadas da obra projetada pelo arquiteto Kengo Kuma, denominada “the great bamboo wall” e construída na China

Fonte: <http://www.communebythegreatwall.com/en/bamboo-wall-house>

O coração da casa é uma sala de chá (Figura 34) que parece flutuar em um espelho d'água e é cercada por brises de bambu que proporcionam privacidade (STANG E HAWTHORNE, 2005). Segundo Terranova (2009), essa sala é situada no centro da edificação onde originam-se duas passarelas que dividem a casa em duas zonas, a do dia e a da noite (dormitórios). Estruturalmente ou não, o bambu envolve todo o espaço e marca a obra arquitetônica pelo ritmo vertical dos colmos justapostos nos painéis deslizantes.



Figura 34 – Sala do chá que é o ambiente central da casa projetada pelo arquiteto Kengo Kuma  
Fonte: Yu (2007).

São inúmeros os projetos arquitetônicos que valorizam o material construtivo bambu e entre as obras há aquelas em que o bambu foi utilizado na sua forma processada. De acordo com Yu (2007), Shigeru Ban é famoso por suas experiências inovadoras utilizando materiais renováveis ou reciclados aplicados na arquitetura e no design de mobiliário. Em umas de suas arrojadas criações, Ban tentou utilizar colmos de bambu natural como elementos estruturais, porém desistiu devido à irregularidade dimensional do material que dificultava as ligações entre colmos e então optou por trabalhar com produtos pré-fabricados à base de bambu, nesse caso o BLC. O arquiteto projetou o telhado da Galeria Rince pertencente à Universidade Rince situada nos EUA onde o BLC foi usado de forma estrutural para suportar as cargas do telhado e as adicionais de vento e neve. Os cálculos e execução de ligações de peças de BLC são mais fáceis do que de colmos, pois as propriedades mecânicas são praticamente homogêneas e as dimensões das peças são uniformes o que é praticamente impossível de ocorrer em colmos de bambu.

O projeto arquitetônico do aeroporto Internacional de Barajas elaborado pela equipe do arquiteto Richard Rogers foi o vencedor do concurso que tinha como intuito construir um aeroporto de 1,2 milhões de m<sup>2</sup> de área construída e com capacidade de receber 60 a 70

milhões de passageiros por ano. O projeto venceu o concurso pelo seu conceito estrutural e simplicidade (Figura35).

Segundo Terranova et al (2009) e Yu (2007), a cobertura curvilínea de estrutura de aço foi forrada com BLC, o qual pôde ser perfeitamente aplicado na construção orgânica, mostrando-se um material leve, elástico e resistente. Um dos fatores mais importantes do conceito arquitetônico foi o uso de luz natural, que foi maximizada por uma porção de claraboias abertas na cobertura.

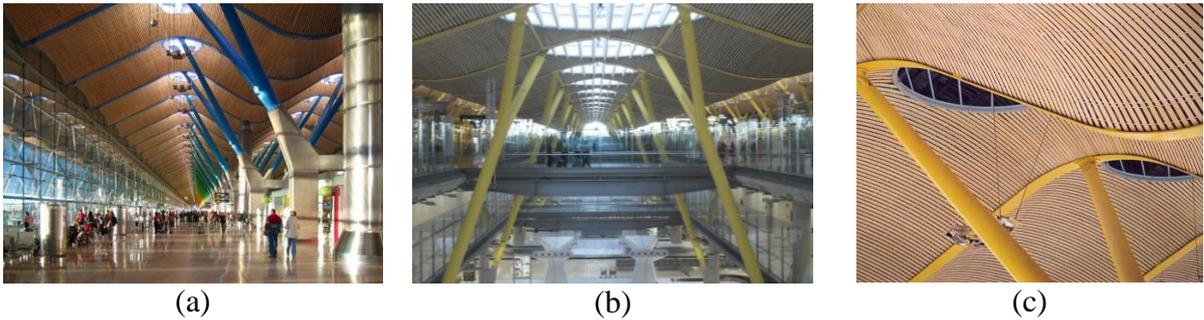


Figura 35 – Aeroporto Internacional de Barajas (a) executado com cobertura de bambu laminado e projetado por Richard Rogers para captar luz natural (b) através de uma sequência de claraboias na cobertura (c)  
Fonte: Yu (2007).



### 3 MATERIAL E MÉTODOS

Com o intuito de padronizar os corpos de prova algumas considerações foram estabelecidas antes da coleta do material. O primeiro parâmetro fixado foi a idade de 4 anos para os colmos, pois nesta idade todas as propriedades de resistência mecânica encontram-se estabilizadas no limite superior. A altura útil do colmo foi estabelecida de acordo com a espessura mínima da parede do colmo necessária para as operações do processo mecânico de obtenção das lâminas. Estabeleceu-se a espessura mínima de 10 mm para a parede do colmo e que salvo casos de ensaios específicos as lâminas foram retiradas da porção mais externa ou mais interna possível para conter maior ou menor proporção de fibras do que a própria parede do colmo. Tendo sido estabelecidas essas considerações, o trabalho de pesquisa foi iniciado com o estudo das propriedades mecânicas do material bruto (ripa) e serrado (lâmina). Basicamente efetuaram-se nesse material maciço os ensaios de cisalhamento (radial e tangencial) e flexão. Os corpos de prova foram retirados dos entrenós e dos nós das ripas e das lâminas. Numa segunda etapa da pesquisa foram testados 2 adesivos (PVA e RF) e a pressão de colagem (1; 2 e 3 MPa) na ligação de duas lâminas para consolidar-se a metodologia mais adequada para a manufatura dos produtos da etapa seguinte da pesquisa. Os corpos de prova produzidos com PVA foram retirados das porções nodais e internodais de lâminas, e os corpos de prova produzidos com RF foram retirados da região internodal das lâminas e foram unidos também sob 3 diferentes pressões, de acordo com as possíveis combinações de faces de contato. O adesivo de melhor desempenho foi utilizado na produção dos corpos de prova de flexão nos quais foram também consideradas as possíveis combinações de faces de contato. Na terceira etapa determinou-se, em função das variáveis obtidas anteriormente, o número adequado de camadas para compor as vigas e a melhor forma de justapor os painéis. Produziram-se então, vigas simples de 3 e 5 camadas de painéis aplainados e não aplainados. Os painéis que formaram as vigas simples foram unidos de acordo com o segundo melhor resultado de resistência ao cisalhamento no plano de cola (2 MPa) porque a melhor pressão (3 MPa) foi considerada muito alta para montagens práticas e porque, aparentemente, causava fissuras nos elementos anatômicos do material. Os resultados alcançados no ensaio de flexão das vigas simples nortearam a produção de vigas de seção composta que foram montadas com 3 camadas de painéis aplainados na mesa e 5 na alma. Os resultados obtidos nos ensaios de flexão no estudo das combinações de colagem também refletiram na montagem final dos componentes das vigas de seção composta. Na Figura 36 está mostrado um esquema ilustrativo da sequência de metodologias realizadas na pesquisa.

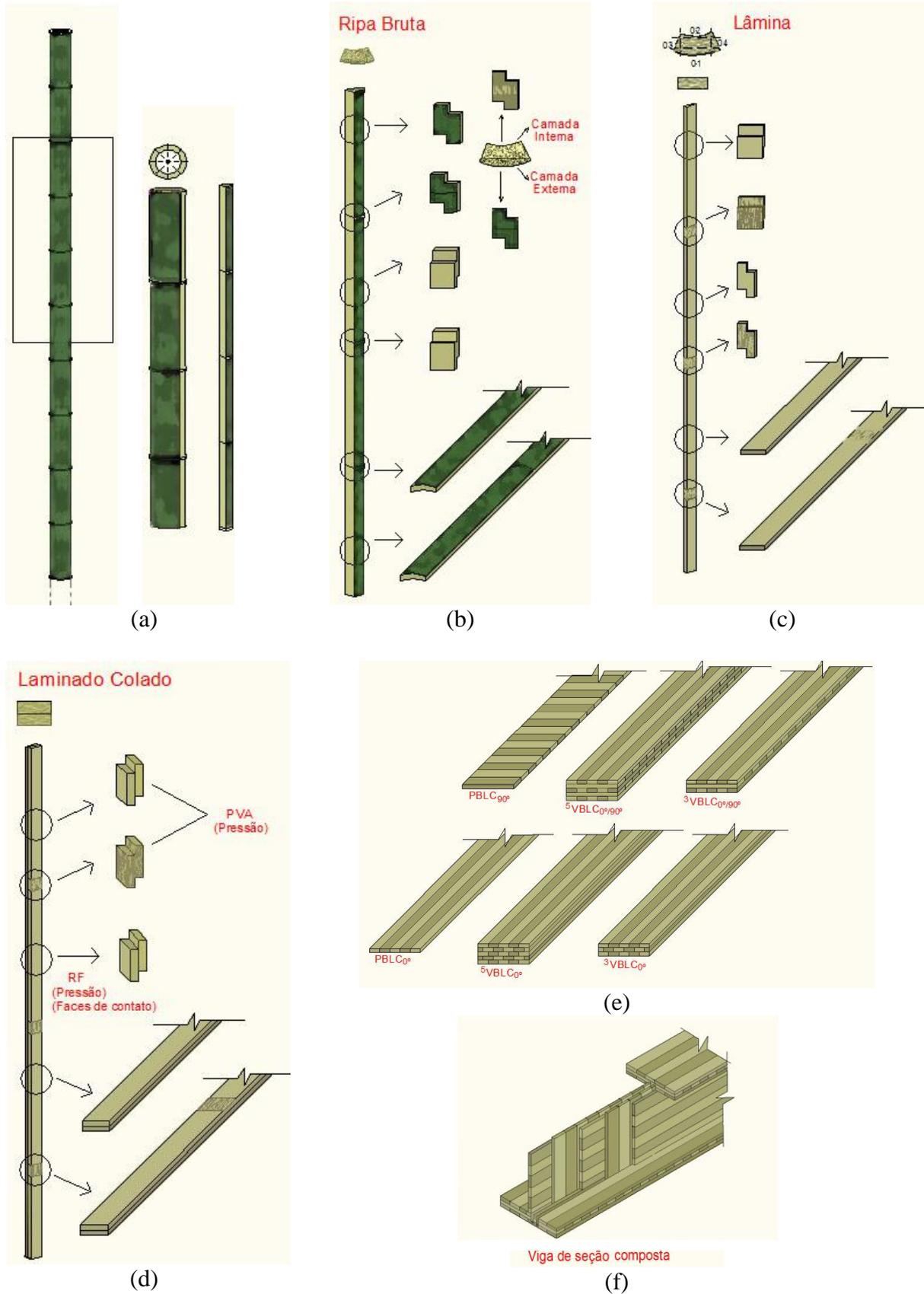


Figura 36 – Esquema ilustrativo da seqüência de metodologias integradas na envoltória do estudo do bambu com detalhes da coleta do material (a), dos corpos de prova da ripa (b) e lâmina (c), vigas bilaminadas coladas (d), vigas simples de seção composta de 3 e 5 camadas (e) e viga de seção composta do tipo I (f)

### 3.1 Material oriundo de touceira manejada

Colmos com idade de 4 anos da espécie *Dendrocalamus giganteus* Munro (Figuras 37 (a) e (b)) foram coletados de touceiras manejadas da Universidade Estadual Paulista (UNESP), campus de Bauru, no mês de setembro (2011). Os colmos de bambu foram subdivididos em comprimentos de aproximadamente 1800 mm e transportados para o Laboratório de Experimentação com Bambu pertencente à mesma universidade, onde foi efetuado o beneficiamento primário. Os colmos foram desdobrados por cortes longitudinais em serra circular refiladeira dupla para obtenção das ripas (Figura 37 (c)) que ainda unidas pelos diafragmas (Figura 37 (d)) foram colocadas e mantidas em um secador com ventilação forçada durante um período de 30 dias.

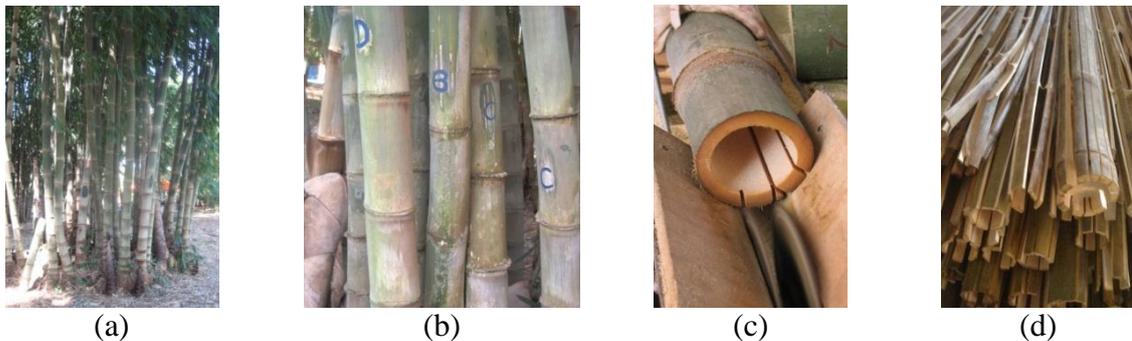


Figura 37 – Touceira manejada do bambu *Dendrocalamus giganteus* (a) com código de identificação da idade dos colmos (b), corte longitudinal dos toretes de bambu em ripas (c) que permaneceram unidas pelo diafragma (d) durante o período de secagem

As ripas unidas entre si pelo diafragma foram transportadas para o Laboratório de Engenharia da Madeira (LEM), localizado no campus Luiz Queiroz da Universidade de São Paulo, para o processo de laminação e produção dos corpos de prova para testes de determinação das propriedades de resistência e de elasticidade do bambu. Essas ripas foram utilizadas para produção de todos os corpos de prova da presente pesquisa de doutorado, exceto para os de painéis curtos de bambu laminado colado (BLC) das vigas simples que foram fabricados com colmos de uma touceira não manejada da Estação Experimental de Ciências Florestais de Anhembi, SP.

### 3.2 Material oriundo de touceira não manejada

Colmos maduros da espécie *D. giganteus* (Figura 38) foram coletados de uma touceira isolada na Estação Experimental de Ciências Florestais de Anhembi, pertencente ao Departamento de Ciências Florestais, da Universidade de São Paulo. A escolha dos colmos foi feita visualmente baseada em informações encontradas na literatura que descrevem que os internódios dos colmos com idade superior a três anos possuem manchas provocadas pela presença de líquens e ausência de brácteas nos nós. Os colmos foram coletados no mês de novembro (2010) e subdivididos em comprimento de 2000 mm com auxílio de uma motosserra e transportados para o Laboratório de Engenharia da Madeira da USP (LEM) para o processo de secagem e processamento mecânico.

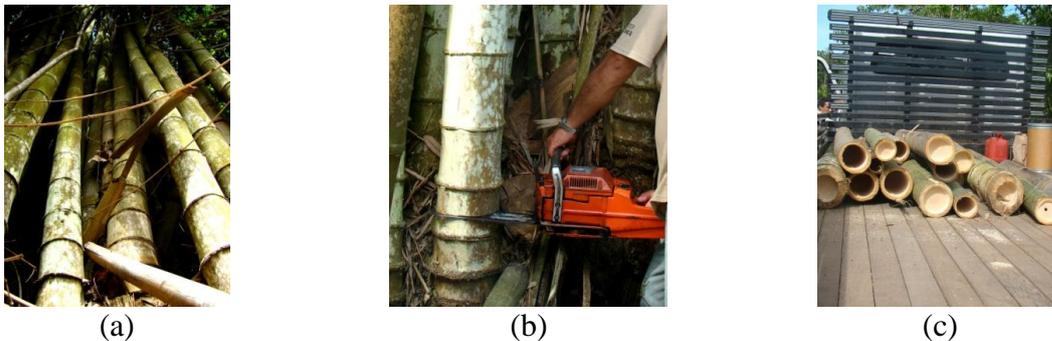


Figura 38 – Touceira de onde foram extraídos os colmos (a) corte basal do colmo com uma motosserra (b) e segmentos de colmo sobre a carroceria do caminhão (c)  
Fonte: Fideles (2009)

As ripas estavam com teor de umidade entre 70 e 80% e foram submetidas ao processo de secagem em estufa regulada para operar na temperatura de 60 °C durante o tempo de secagem de 5 dias. A variação do teor de umidade das ripas foi monitorada com um medidor elétrico de agulha e, na umidade de equilíbrio ao ar, o lote de ripas foi retirado da estufa e armazenado em ambiente laboratorial por 2 meses.

### 3.3 Processamento de transformação de ripa em lâmina

O processamento mecânico para transformação de ripas em lâminas iniciou-se com a retirada dos diafragmas e dos nós de cada ripa numa serra circular. Na produção de lâminas dos colmos de bambu, utilizou-se uma plaina desgrossadeira de uma face calibrada para ajustar as faces (externa e interna) das ripas e padronizar a espessura em 10, 8 ou 5 mm, e uma serra

circular para ajustar as bordas laterais e a largura para 20 mm (Figura 39). As lâminas foram produzidas em diferentes espessuras para obter-se um melhor aproveitamento dos colmos.

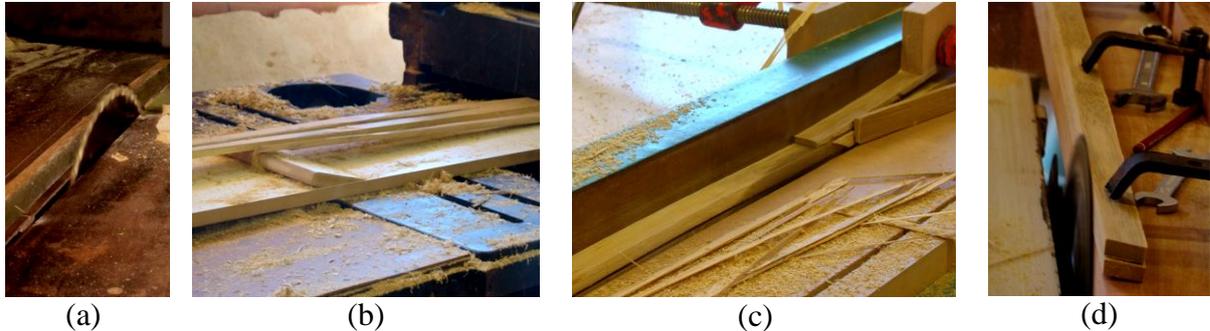


Figura 39 – Retirada dos nós (a) das ripas utilizando serra circular e ajustes das faces na plaina desengrossadeira (b) e das bordas e na serra circular (c) e (d)

Para produção de todas as lâminas foi feito um desgaste mínimo da camada externa da ripa, ou seja, o necessário para deixá-la plana e a espessura foi ajustada com o desgaste necessário da camada interna.

### 3.4 Corpos de prova para os ensaios mecânicos

As ripas de diferentes espessuras, medindo 25 mm de largura e 1800 mm de comprimento, e as lâminas medindo 20 mm de largura, 8 mm de espessura e 1800 mm de comprimento, utilizadas na produção dos corpos de prova, foram escolhidas aleatoriamente de seus respectivos lotes. O intuito de seguir este procedimento foi garantir a representatividade dos dados de resistência ao cisalhamento radial longitudinal, tangencial longitudinal e à flexão tanto para o material maciço quanto para o colado.

Para a produção dos corpos de prova para o ensaio de resistência ao cisalhamento, as ripas e lâminas tiveram seus comprimentos redimensionados para 40 mm e 30 mm, respectivamente. Todos os corpos de prova do material bruto (ripa) e processado (lâmina e laminado colado) foram produzidos a partir de peças dos entrenós e dos nós, sendo que os nodais foram produzidos de forma que os nós ficassem localizados no centro do corpo de prova. Para os corpos de prova de bambu laminado colado (BLC) utilizaram-se 2 adesivos seguindo as especificações dos respectivos boletins técnicos. Para o adesivo à base de resorcionol-formaldeído utilizou-se a gramatura de 300 g/m<sup>2</sup> e para o adesivo à base de PVA 250 g/m<sup>2</sup>.

### 3.4.1 Cisalhamento radial longitudinal

#### 3.4.1.1 Ripa

Para testar a resistência ao cisalhamento radial da ripa utilizaram-se ripas de diferentes espessuras e, para testar a resistência radial de suas camadas interna (rica em parênquima) e externa (rica em fibras), procedeu-se um corte, numa serra de fita de mesa, no plano longitudinal tangencial que passa pela meia espessura da ripa isolando-se as duas metades de mais ou menos 3 mm de espessura que foram denominadas de camada interna e externa. Tanto nos corpos de prova que representavam a ripa quanto naqueles que representavam as camadas internas e externas das ripas, foram feitos, com o auxílio de uma serra circular, dois dentes de 12,5 mm x 10 mm. A Figura 40 ilustra a forma final dos corpos de prova nodais e internodais do material bruto e das camadas internas e externas das ripas. Para os testes de resistência ao cisalhamento das camadas externas e internas da parede do colmo foram feitas 12 repetições e, para os corpos de prova que simulavam o material bruto, respeitando a espessura natural, foram produzidas 20 repetições.

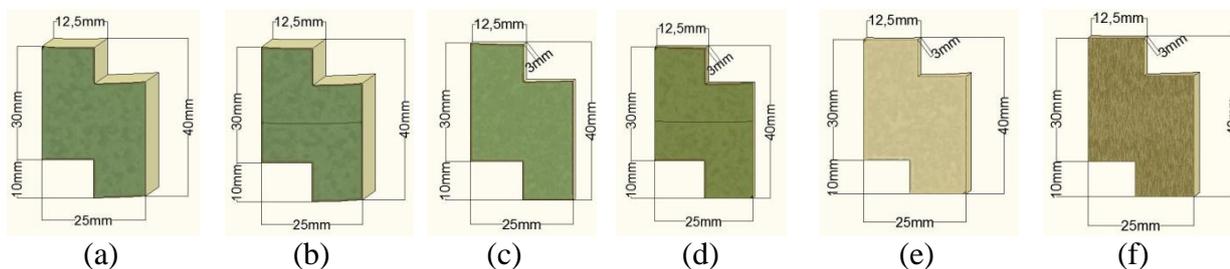


Figura 40 – Corpos de prova para o ensaio de resistência ao cisalhamento radial da ripa sem nó (a) e com nó (b), da camada externa sem nó (c) e com nó (d) e da camada interna sem nó (e) e com nó (f)

#### 3.4.1.2 Lâmina

Nas extremidades das lâminas de 30 mm de comprimento foram efetuados dois dentes de 10 mm x 10 mm para se transformarem nos corpos de prova similares ao da ASTM D905, onde em um dos dentes acomoda-se o cutelo tipo guilhotina e no outro encaixa-se a base do equipamento. Para os testes de resistência ao cisalhamento radial das lâminas foram feitas 22 repetições. O esquema dos corpos de prova utilizados no ensaio de cisalhamento radial paralelo às fibras é mostrado na Figura 41.



Figura 41 – Corpos de prova para o ensaio de resistência ao cisalhamento das lâminas internodais (a) e nodais (b)

### 3.4.1.3 Análise microscópica da região de ruptura radial de corpo de prova cisalhado

Com o intuito analisar a ruptura dos elementos anatômicos do corpo de prova, após o ensaio de resistência ao cisalhamento radial das ripas, das camadas interna e externa das ripas e das lâminas, as respectivas áreas que sofreram as tensões provocadas pelo ensaio mecânico foram polidas com uma lâmina cortante e observadas em estereomicroscópio da marca Leica – modelo EZ4D com capacidade de aumento de 35 vezes, pertencente ao Laboratório de Histopatologia e Biologia Estrutural de Plantas do Centro de Energia Nuclear na Agricultura (CENA/USP). As imagens foram capturadas com uma câmera acoplada a um computador regido pelo software Leica LASEZ.

## 3.4.2 Cisalhamento tangencial longitudinal

### 3.4.2.1 Ripa

Na produção dos corpos de prova para avaliar a resistência tangencial da ripa utilizou-se uma serra circular para efetuar dois cortes de 15 mm no plano tangencial longitudinal, ou seja, nas faces externas e internas da ripa de 40 mm de comprimento. Utilizou-se a medida de 10 mm de altura para a área a ser cisalhada, a fim de evitar o esmagamento das fibras e proporcionar o cisalhamento genuíno na área determinada. No caso do cisalhamento radial, é mais difícil de ocorrer o esmagamento, pois a resistência ao cisalhamento é menor do que a do plano tangencial.

Para cada tratamento foram feitas 20 repetições. A Figura 42 refere-se à geometria adotada dos corpos de prova da ripa para a determinação da resistência ao cisalhamento tangencial.



Figura 42 – Corpos de prova internodal (a) e nodal (b) para determinação da resistência ao cisalhamento tangencial do bambu

### 3.4.2.2 Lâmina

Para determinar a resistência ao cisalhamento tangencial das lâminas, os corpos de prova foram produzidos efetuando-se, nas camadas interna e externa das lâminas, dois cortes de 10 mm de altura no plano tangencial longitudinal, restando 200 mm<sup>2</sup> para a área de cisalhamento. O esquema dos corpos de prova utilizados para determinar a resistência ao cisalhamento tangencial longitudinal pode ser observado na Figura 43.



Figura 43 – Dimensionamento dos corpos de prova sem nó (a) e com nó (b) da lâmina para determinação da resistência ao cisalhamento tangencial do bambu

### 3.4.2.3 Análise da ruptura sob o microscópio Estereoscópio

O objetivo e o equipamento utilizado para analisar a área cisalhada dos corpos de prova foram os mesmos citados no item 3.4.1.3 (Análise microscópica da região de ruptura radial de corpo de prova cisalhado). Após o ensaio de resistência ao cisalhamento tangencial, a área de ruptura foi analisada no estereomicroscópio sem efetuar-se o polimento das superfícies que sofreram as tensões no ensaio.

### 3.4.2.4 Laminado colado com PVA

Para a produção dos corpos de prova laminados colados com adesivo à base de Polivinil Acetato (PVA) foram utilizados dois tipos de lâminas com e sem a presença de nós. No procedimento de colagem de cada corpo de prova, utilizou-se  $250 \text{ g/m}^2$  do adesivo que foi aplicado com auxílio de um pincel nas duas superfícies das lâminas que formaram o corpo de prova. Ao todo foram produzidos 90 corpos de prova, sendo 20 internodais e 10 nodais para cada pressão aplicada de 1, 2 e 3 MPa. A ilustração do corpo de prova usado no processo de colagem e no ensaio de resistência ao cisalhamento tangencial no plano de cola é mostrada na Figura 44.

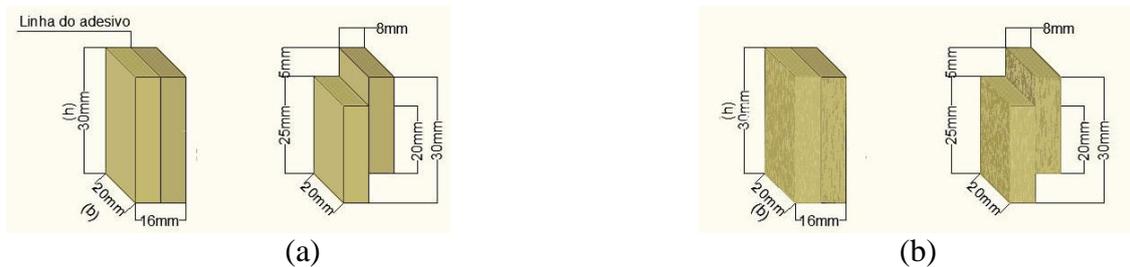


Figura 44 – Bi-laminado colado base para a produção do corpo de prova de cisalhamento internodal (a) e nodal (b)

Para que os corpos de prova ficassem alinhados no ato da colagem e para que fossem mantidos sob pressão constante, os mesmos foram inseridos numa fôrma de madeira com uma das faces removível que foi fixada com grampos de carpinteiro após a inserção de todos os corpos de prova na fôrma. O procedimento de confinamento dos corpos de prova para prensagem sob carga constante está ilustrado na Figura 45.

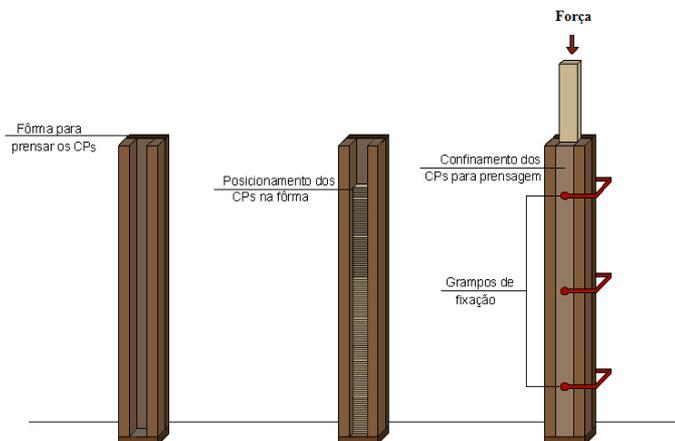


Figura 45 – Fôrma para confinamento e prensagem de corpos de prova empilhados e sujeitos à mesma pressão imposta pela força constante aplicada no êmbolo

Os corpos de prova foram prensados pela ação de cargas mortas colocadas em pontos específicos na barra articulada mostrada na Figura 46. A força aplicada pela barra no êmbolo de compressão da pilha de corpos de prova foi calculada em função da distância do aplicador de força à articulação da barra, do peso próprio da barra, do peso morto disponível e da distância de sua linha de ação à articulação. Foram adotadas as pressões de 1, 2 e de 3 MPa para estudar-se um possível efeito da pressão aplicada na colagem de corpos de prova de superfícies simplesmente acabadas nas condições de trabalho rotineiro de uma plaina desgrossadeira. A pilha de corpos de prova inseridos na fôrma foi posicionada abaixo do aplicador fixado no ponto A da prensa mostrada na Figura 46 e a carga morta que resulta na pressão desejada foi posicionada no ponto C. A distância do ponto A à articulação, que é ajustável, foi calculada para cada situação do experimento e a distância do ponto C à articulação, que pode ser variável, foi calculada para cada caso e por fim fixada num valor conveniente para possibilitar a aplicação das pressões desejadas.

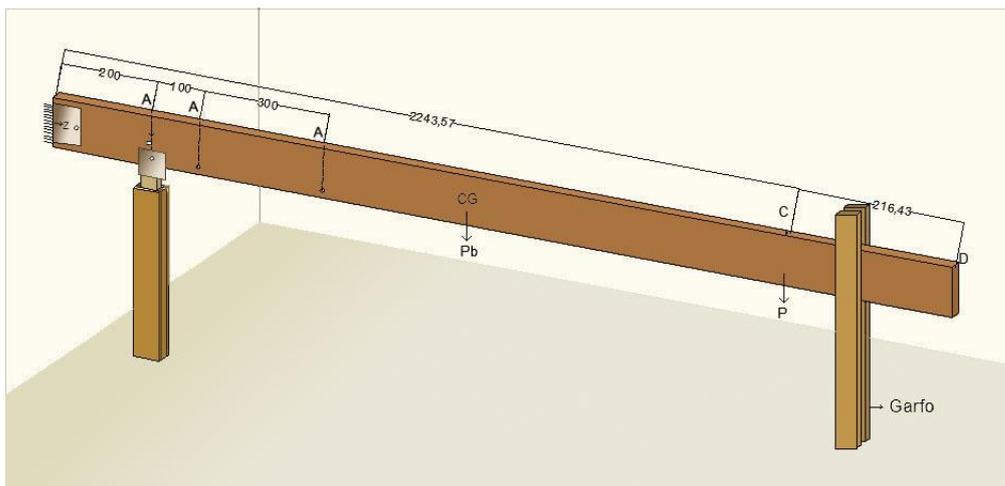


Figura 46 – Prensa idealizada para aplicação de força ( $F$ ) constante nos corpos de prova pela ação do peso próprio da barra ( $P_b$ ) e de carga morta ( $P$ )

A força ( $F$ ) aplicada na área ( $A$ ) de colagem para obter a pressão ( $p$ ) desejada foi calculada pela equação (1) que foi transformada na equação (2) com a substituição da área cisalhada pela área de colagem que foi obtida pela multiplicação da base ( $b$ ) pela altura ( $h$ ) mostradas na Figura 44.

$$p = \frac{F}{A} \quad (1)$$

$$F = pbh \quad (2)$$

O peso ( $P$ ) aplicado no ponto C da barra foi pré-calculado para gerar a força ( $F$ ) exigida na colagem dos corpos de prova, de acordo com a equação (5) que foi obtida pela simplificação algébrica da equação (4) que veio da equação de equilíbrio de momento dada em (3) e na qual foi incorporada a equação (2).

$$\sum M_{(0)} = 0 \Rightarrow Pz_C + P_b \frac{z_D}{2} - Fz_A = 0 \quad (3)$$

$$z_C = \frac{pbhZ_A - \frac{P_b Z_D}{2}}{P} \quad (4)$$

$Z_A$  e  $Z_D$ : coordenadas dos pontos A e D, respectivamente.

A equação (5) é genérica e permite calcular a coordenada ( $Z_C$ ) da carga morta ( $P$ ) em função da pressão  $p$  desejada, da carga morta disponível, dos lados  $b$  e  $h$  da área a ser colada e da coordenada  $Z_A$  que define a posição da pilha de corpos de prova a serem prensados.

$$z_C = \frac{2pbhZ_A - P_b Z_D}{2P} \quad (5)$$

A Tabela 4 mostra as coordenadas  $Z_C$  calculadas para as condições fixadas de  $P_b=165N$  e  $Z_D=2460$  mm que representa o comprimento total da barra articulada.

Tabela 4 – Coordenadas e valores que definiram as condições de prensagem dos corpos de prova para cisalhamento no plano de cola de faces tangenciais de lâminas

$p$ (MPa)	$P$ (N)	$Z_A$ (mm)	$Z_C$ (mm)
1	70	600	2243,57
2	70	300	2243,57
3	70	200	2243,57

#### 3.4.2.4.1 Análise sob Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

O microscópio eletrônico de varredura (MEV) foi utilizado para avaliar a influência das pressões 1, 2 e 3 MPa na ancoragem do adesivo no tecido anatômico das lâminas. Analisou-se a superfície do plano tangencial da área cisalhada após o ensaio de resistência ao cisalhamento no plano de cola e a superfície do plano transversal de amostras de,

aproximadamente, 10 mm x 8 mm, que foram retiradas do centro da área cisalhada de uma das lâminas que compunham o corpo de prova. As superfícies das amostras foram preparadas em um micrótomo de deslize da marca Leica, modelo SM 2000 R, do Laboratório de Anatomia da Madeira do Departamento de Ciências Florestais da ESALQ/USP. As amostras foram fixadas em “stubs” (de aproximadamente 15 mm de diâmetro) utilizando-se fita dupla-face juntamente com cola de prata, recobertas com uma fina camada de ouro e analisadas no microscópio eletrônico da marca Zeiss modelo LEO 435 VP, do Núcleo de Apoio à Pesquisa em Microscopia Eletrônica Aplicada à Agricultura da ESALQ/USP.

### 3.4.2.5 Laminado colado com adesivo Resorcinol-formaldeído (RF)

Para a produção dos corpos de prova laminados colados com adesivo à base de RF foi levada em consideração a combinação de faces de contato de acordo com a posição que a lâmina ocupava dentro da parede do colmo. Em cada lâmina foi identificada a face mais próxima da casca para possibilitar as montagens das 3 combinações possíveis, camada externa x camada externa (e=e), camada interna x camada interna (i=i) e camada externa x camada interna (e=i), conforme ilustrado na Figura 47.

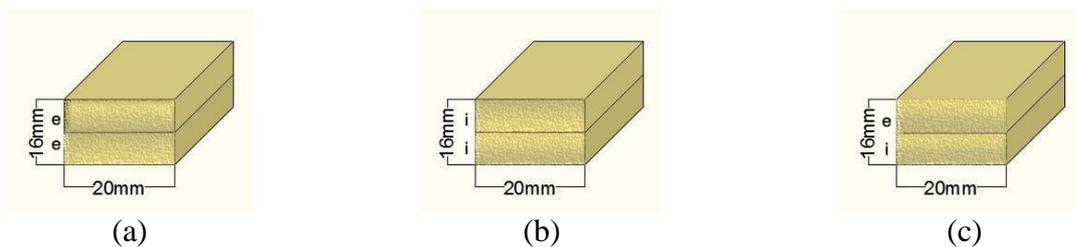


Figura 47 – Camada externa x camada externa (a), camada interna x camada interna (b), camada externa x camada interna (c)

A montagem dos corpos de prova seguiu as combinações de faces de contato pré determinadas utilizando lâminas sem a presença de nós. No processo de colagem utilizou 300 g/m<sup>2</sup> do adesivo à base de RF cuja aplicação foi efetuada nas duas superfícies das lâminas com auxílio de um pincel; em seguida as lâminas foram unidas e prensadas. A Figura 48 refere-se ao esquema de colagem e mostra as dimensões finais dos corpos de prova.

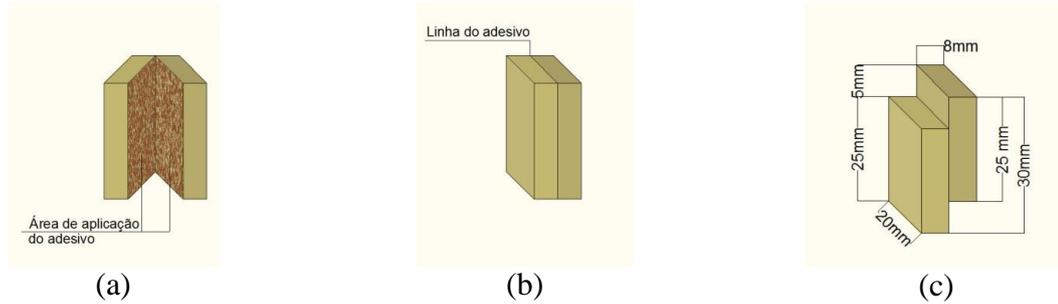


Figura 48 – Esquema de aplicação do adesivo na lâmina (a), nas lâminas, corpo de prova antes de prensar (b) e corpo de prova para ensaiar

Os procedimentos de confinamento dos corpos de prova e prensagem foram os mesmos utilizados no item 3.4.2.4 (Laminado colado com PVA), ou seja, utilizando-se a prensa regulada por meio da aplicação de carga morta e cálculos de equações de equilíbrio de momentos. A regulagem das diferentes pressões foi calculada levando-se em consideração os pontos de cargas e suas distâncias na barra apresentadas na Figura 46 e na Tabela 4. Os cálculos seguiram o mesmo princípio do item anterior. No total foram produzidos 90 corpos de prova, sendo 10 para cada combinação de faces de contato unidas sob as três pressões estudadas (1; 2 e 3 MPa).

#### 3.4.2.5.1 Análise sob microscopia óptica

O microscópio óptico foi utilizado para observar o tecido anatômico da parede do colmo nas regiões externa e interna, ou seja, próximo à casca e à lacuna do colmo e para observar a penetração do adesivo nos elementos anatômicos das lâminas, dentro das combinações estudadas para o material processado internodal. As amostras foram analisadas utilizando-se imagens geradas por uma câmera acoplada ao microscópio óptico (MO). Para a preparação do material bruto, ou seja, das camadas externa e interna da parede do colmo retirou-se uma pequena porção de 15 mm de largura, 18 mm de comprimento e 15 mm de espessura da parede de um colmo da espécie *D. giganteus* de quatro anos. Em seguida, essa amostra foi imersa em água até atingir a saturação total das fibras e, posteriormente, foi fervida com água glicerinada para favorecer o amolecimento necessário para retirada dos cortes de espessuras em torno de 10 a 20  $\mu\text{m}$ , utilizando-se um micrótomo de deslize da marca Leica, modelo SM 2000 R. Na Figura 49 observa-se uma amostra sendo fervida em água glicerinada e a retirada de um corte da seção transversal.

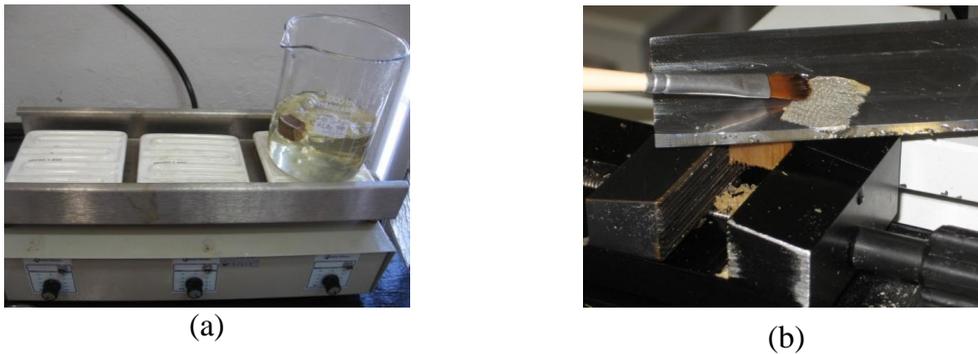


Figura 49 – Amostra sendo fervida em água glicerinada (a) e a retirada do corte transversal no micrótomo de deslize

Os cortes foram tratados em solução de hipoclorito de sódio, lavados em água destilada e desidratados de forma gradual utilizando-se etanol 50%. Posteriormente foram coloridos com safranina e novamente lavados em etanol 50% para a retirada do excesso do corante. Os cortes foram novamente desidratados gradualmente e lavados em etanol 100% e em soluções de acetato de butila diluídas em álcool nas concentrações 1:3, 1:1 e 3:1 até atingir a concentração pura. Os cortes foram montados em lâminas de vidro permanente. Para a preparação do material processado, as lâminas foram unidas com adesivo à base de resorcinol formaldeído utilizando-se baixa pressão para não danificar o tecido anatômico da planta. Após a cura do adesivo, retirou-se uma porção de aproximadamente 12 mm de largura, 10 mm de comprimento e 10 mm de espessura, para cada uma das combinações de colagem. As superfícies das amostras foram umedecidas com água para favorecer a retirada dos cortes na espessura de aproximadamente 10 a 20  $\mu\text{m}$  no micrótomo de deslize. Os cortes foram montados em lâminas de vidro de forma não permanente sem terem passado pelo processo de desidratação, lavagem e coloração.

Todas as lâminas de vidro foram conduzidas ao microscópio óptico da marca Zeiss Axioskop, pertencente ao Núcleo de Apoio à Pesquisa em Microscopia Eletrônica Aplicada à Agricultura (NAP/MEPA/ESALQ - USP), sendo fotografadas com câmera a ele acoplada.

#### 3.4.2.5.2 Análise sob Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

O microscópio eletrônico de varredura foi utilizado para analisar a penetração do adesivo RF nas lâminas internodais unidas de acordo com as combinações de faces de contato. Retirou-se do centro dos corpos de prova intactos, uma pequena amostra de aproximadamente 10 mm de largura, 7 mm de espessura e 8 mm de comprimento. As superfícies no plano transversal das amostras foram preparadas passando diversas vezes em um micrótomo de deslize da marca

Leica, modelo SM 2000 R. Em seguida, as amostras foram fixadas em “stubs” de aproximadamente 10 mm de diâmetro utilizando-se fita dupla-face juntamente com cola de prata. As amostras foram recobertas com fina camada de ouro e analisadas no microscópio eletrônico da marca do Núcleo de pesquisa em Geoquímica e Geofísica da Litosfera (NUPEGEL/ESALQ - USP) e Núcleo de Apoio à Pesquisa em Microscopia Eletrônica Aplicada a Agricultura da ESALQ/USP e fotografadas com câmera acoplada à um computador.

### 3.4.2.5.3 Análise sob Microscopia de Fluorescência

Para analisar a penetração do adesivo nos elementos anatômicos das lâminas, foram produzidos corpos de prova seguindo as combinações de colagem de acordo com as faces de contato utilizando-se adesivo à base de RF acrescido de um corante fluorescente em pó denominado Rodamina B. Lâminas dimensionadas com 20 mm largura, 3 mm de comprimento e 8 mm de espessura foram utilizadas para a produção de 12 corpos de prova. A aplicação do adesivo foi efetuada com auxílio de um pincel nas duas superfícies das lâminas, as quais foram unidas imediatamente após a aplicação e prensadas com sargento. As três combinações de colagem, o preparo do adesivo com o corante Rodamina B e a aplicação nas faces das lâminas podem ser vistos na Figura 50.

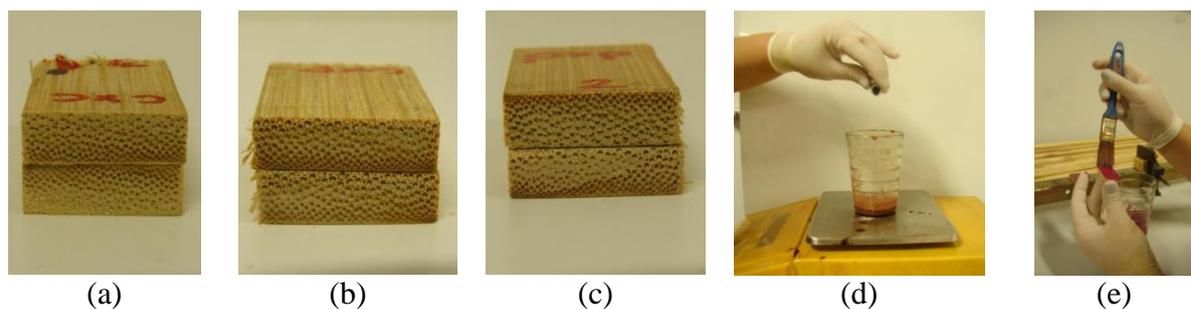


Figura 50 – Lâminas utilizadas no processo de colagem de acordo com as faces de contato, externa x externa (a), interna x externa (b) e interna x interna (c), a preparação do adesivo com o corante rodamina B (d) e aplicação do adesivo na lâmina (e)

Após a cura do adesivo retirou-se do centro dos corpos de prova amostras dimensionadas com aproximadamente 12 mm de largura, 10 mm de comprimento e 10 mm de espessura, de maneira que a linha do adesivo estivesse a mais centralizada possível na amostra. Para facilitar os cortes de 10 a 20  $\mu\text{m}$  no micrótomo de deslize, as superfícies das amostras foram umedecidas com água. Os cortes da seção transversal foram montados em lâminas de vidro

não permanente, conduzidos ao microscópio óptico da marca Leica modelo DMLB e fotografados com câmera também da marca Leica modelo DC300, acoplada a um computador de mesa do Laboratório de Anatomia Vegetal do Departamento de Ciências Biológicas LCB/ESALQ/USP

### 3.4.3 Flexão

#### 3.4.3.1 Ripa

Os corpos de provas utilizados nos ensaios de resistência à flexão de ripa serrada bruta (Figura 51), foram seccionados transversalmente numa serra circular simples com o auxílio de uma guia transversal à serra, de tal forma a serem obtidas peças de 300mm de comprimento. Os corpos de prova foram retirados da região internodal e nodal e, para simular a situação mais crítica da influência do nó na resistência à flexão, os corpos de prova nodais foram produzidos de forma a situar o nó na metade do seu comprimento. Foram produzidas 20 repetições para cada tratamento.

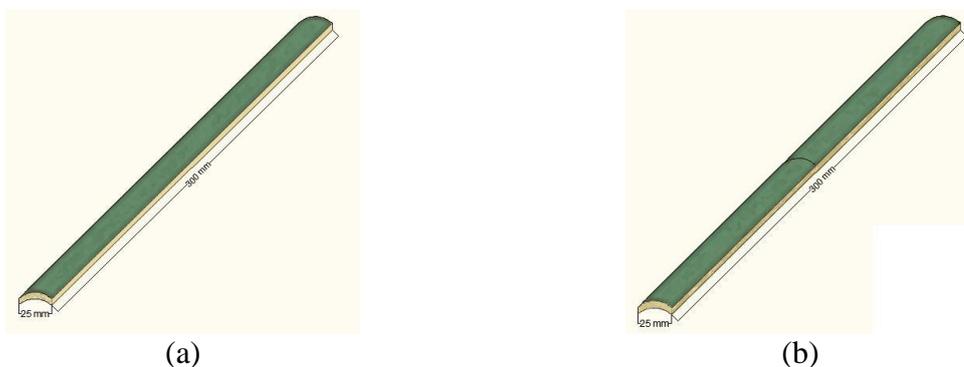


Figura 51 – Corpos de provas adotados para determinação da resistência à flexão de ripa bruta internodal (a) e nodal (b)

#### 3.4.3.2 Lâmina

As lâminas obtidas de ripas brutas foram seccionadas transversalmente em serra circular e transformaram-se em lâminas curtas de 300 mm comprimento. Essas lâminas curtas foram tomadas como corpos de provas (Figura 52) para a determinação da resistência à flexão de lâmina com e sem nó. Foram produzidos 22 corpos de prova para cada tratamento.

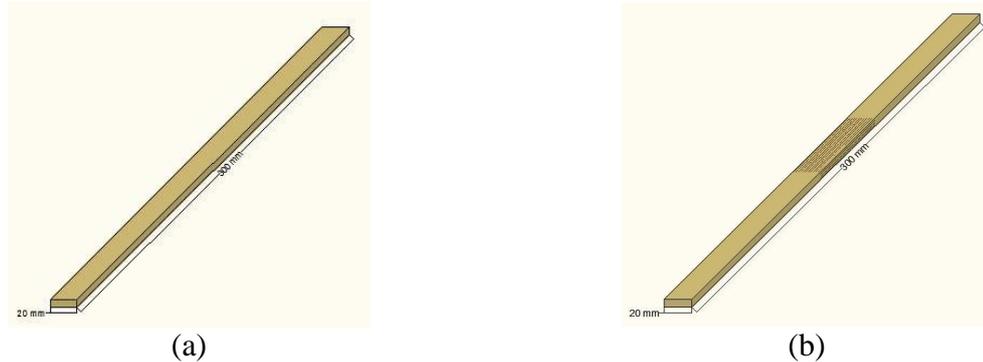


Figura 52 – Corpos de prova idealizados para testar a resistência à flexão de lâminas internodais (a) e que contém um nó na metade do comprimento (b)

### 3.4.3.3 Laminado colado com RF

Foram selecionadas 72 lâminas para a produção dos corpos de prova de bambu laminado colado com adesivo à base de RF. A face mais externa de cada lâmina foi identificada para servir de referência na montagem dos corpos de prova, segundo as combinações de face de contato usadas no processo de colagem do presente estudo. O comprimento das lâminas foi redimensionado para 300 mm numa serra circular. A produção dos corpos de prova com a presença de nós seguiu o mesmo procedimento adotado para o ensaio de flexão de ripas e lâminas, ou seja, o nó foi posicionado no centro do corpo de prova. Cada corpo de prova foi composto por duas lâminas unidas pelo adesivo RF. O procedimento de colagem adotado foi o mesmo para todas as combinações de colagem e tipos internodais e nodais de corpos de prova. O adesivo foi preparado e aplicado em uma das faces de cada lâmina utilizando um pincel. Em seguida, as lâminas foram unidas e posicionadas na fôrma para serem prensadas. Seis conjuntos de lâminas foram prensados de cada vez (Figura 53).

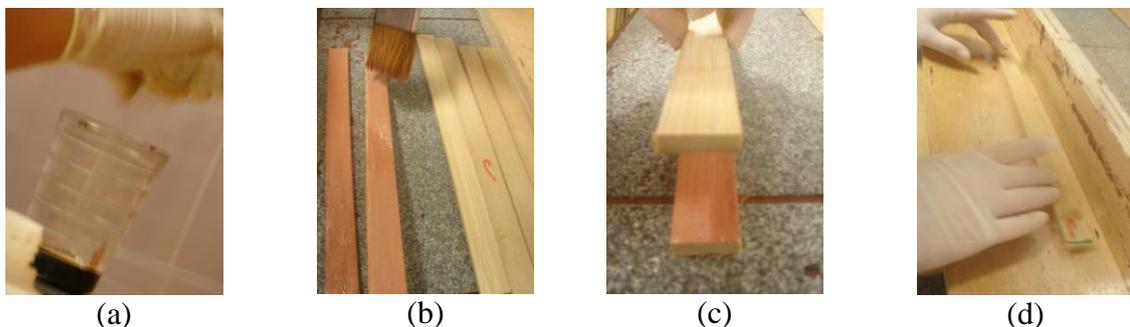


Figura 53 – Preparação do adesivo (a), aplicação do adesivo em uma das faces da lâmina (b), união das lâminas com adesivo (c) e posicionamento do corpo de prova dentro da fôrma

A pressão de 3 MPa é utilizada mais para regularizar certos defeitos das lâminas do que propriamente para a colagem. Na presente pesquisa foi utilizada a pressão de 2 MPa para a colagem das lâminas, tendo em vista que suas superfícies apresentavam-se regulares.

Os painéis foram armazenados em ambiente com temperatura controlada por 10 dias. Foram produzidas 6 repetições para cada combinação de faces de contato na colagem.

#### **3.4.3.4 Viga simples**

As vigas simples do presente estudo foram formadas por 3 e 5 camadas de painéis de bambu coladas umas sobre as outras. As lâminas oriundas dos colmos da Estação Experimental de Anhembi foram utilizadas para produzir 2 tipos de painéis de bambu laminado colado (PBLC) que quando unidos pelo adesivo originaram 4 tipos de vigas de bambu laminado colado (VBLC). Parte das vigas foi composta por PBLC aplainados e a outra parte composta por PBLC sem o tratamento de superfície, ou seja, foram utilizados painéis sem sofrer o reprocessamento mecânico.

##### **3.4.3.4.1 Painéis individuais de composição da viga simples**

Os painéis individuais PBLC<sub>0°</sub> e PBLC<sub>90°</sub> foram assim denominados devido à orientação das fibras em relação ao seu eixo na viga produzida. Para cada PBLC<sub>0°</sub> utilizaram-se 5 lâminas medindo 20 mm de largura e aproximadamente 900 mm de comprimento e, dependendo do tipo de painel, a espessura  $h$  de 8 ou 5 mm. Para os painéis PBLC<sub>90°</sub> de comprimento 900 mm utilizaram-se 45 lâminas medindo 20 mm de largura, 5 mm de espessura e 140 mm de comprimento. O mesmo procedimento de colagem foi adotado para ambos os tipos de painéis. Antes de iniciar o processo de colagem, fez-se uma seleção de lâminas posicionando-as em uma das superfícies da fôrma de modo que deixassem o mínimo de espaço entre elas. Em seguida, as lâminas selecionadas foram enumeradas e coladas. Com auxílio de um pincel espalhou-se adesivo nas bordas das lâminas, com exceção daquelas referentes a serem colocadas nas bordas dos painéis. As lâminas foram unidas imediatamente após a aplicação do adesivo e foram reposicionadas na superfície da fôrma, que foi fechada utilizando-se parafusos. Antes do fechamento da fôrma, duas lâminas sem adesivo foram inseridas para atuar como peças de transição entre o distribuidor de carga e os painéis. Na produção de ambos os tipos de PBLC a orientação das lâminas foi executada de forma que as faces das camadas externas das lâminas coladas formassem uma das superfícies do painel produzido, ou

seja, seguindo a mesma orientação da parede do colmo. O processo de seleção das lâminas dos painéis PBLC<sub>0°</sub> e PBLC<sub>90°</sub> e a colagem do PBLC<sub>0°</sub> podem ser vistos na Figura 54.

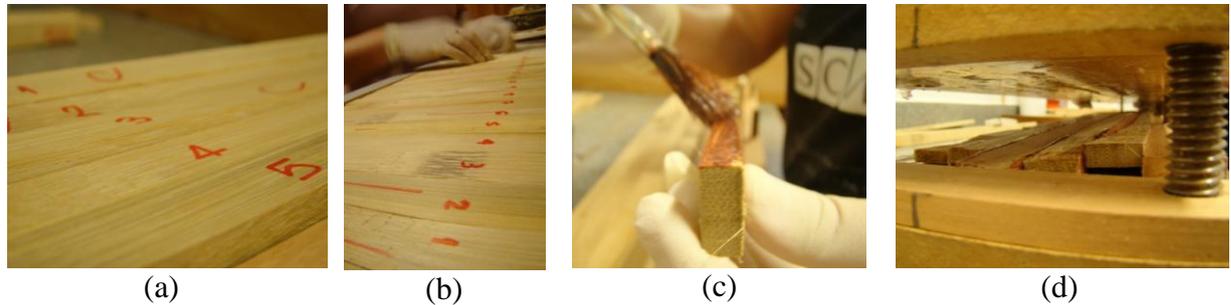


Figura 54 – Lâminas selecionadas para produção do PBLC<sub>0°</sub> (a) e PBLC<sub>90°</sub> (b), aplicação do adesivo em uma das bordas da lâmina do PBLC<sub>0°</sub> (c) e fechamento da fôrma com as lâminas posicionadas em uma de suas superfícies (d)

Para prensar os PBLC<sub>0°</sub> utilizou-se uma prensa hidráulica com um único ponto de aplicação de carga. Sob o centro do pistão da prensa posicionou-se a fôrma que foi contraventada por duas barras de madeira posicionadas nas faces frontal e traseira da fôrma; as barras de madeira foram presas entre si com grampos de marceneiro. Este procedimento foi executado para evitar o encurvamento da fôrma, provocado pela pressão aplicada nas lâminas e, conseqüentemente, no painel produzido. O processo de prensagem dos PBLC<sub>0°</sub> pode ser observado na Figura 55.



Figura 55 – Posicionamento da fôrma na prensa (a), fôrma com a peça de distribuição de pressão e barras de madeira (b) para travamento da fôrma com grampo de marceneiro (c) e posicionamento da 2ª peça utilizada para distribuição uniforme da pressão na prensagem de um painel 0°

Para prensar os PBLC<sub>90°</sub> utilizou-se prensa hidráulica com único ponto de aplicação de carga do Laboratório Ensaio Mecânicos de Madeira e Derivados que também tem. Sob o centro do pistão da prensa posicionou-se a fôrma de MDF sem travamento nas faces frontal e traseira da fôrma. Aplicou-se 1 MPa para prensagem das bordas laterais dos painéis, durante o período

de 24 horas. A carga a ser aplicada na prensagem de cada tipo de painel foi calculada pela equação (1) mostrada na página 62.

Após o tempo de cura da cola (10 dias) os painéis individuais foram ajustados para as dimensões finais. Ao todo foram fabricados 48 PBLC de 100 mm de largura e 900 mm de comprimento. Doze dos vinte e quatro painéis de PBLC<sub>0°</sub> e de PBLC<sub>90°</sub> tiveram suas superfícies reprocessadas em plaina desgrossadeira ou em lixadeira, de acordo com o tipo de painel. O comprimento dos painéis foi reduzido para 450 mm, originando 96 PBLC. Para os PBLC<sub>0°</sub> utilizou-se plaina desgrossadeira para uniformizar as superfícies. Os de 8 mm de espessura foram reduzidos para 6 mm, e os de 5 mm para 4 mm. Para os PBLC<sub>90°</sub> a uniformização das superfícies foi executada utilizando uma lixadeira de fita, os painéis com 5mm de espessura foram reduzidos para 4 mm. As dimensões das VBLC e de suas respectivas camadas nas condições não plainadas e plainadas são vistas na Figura 56.

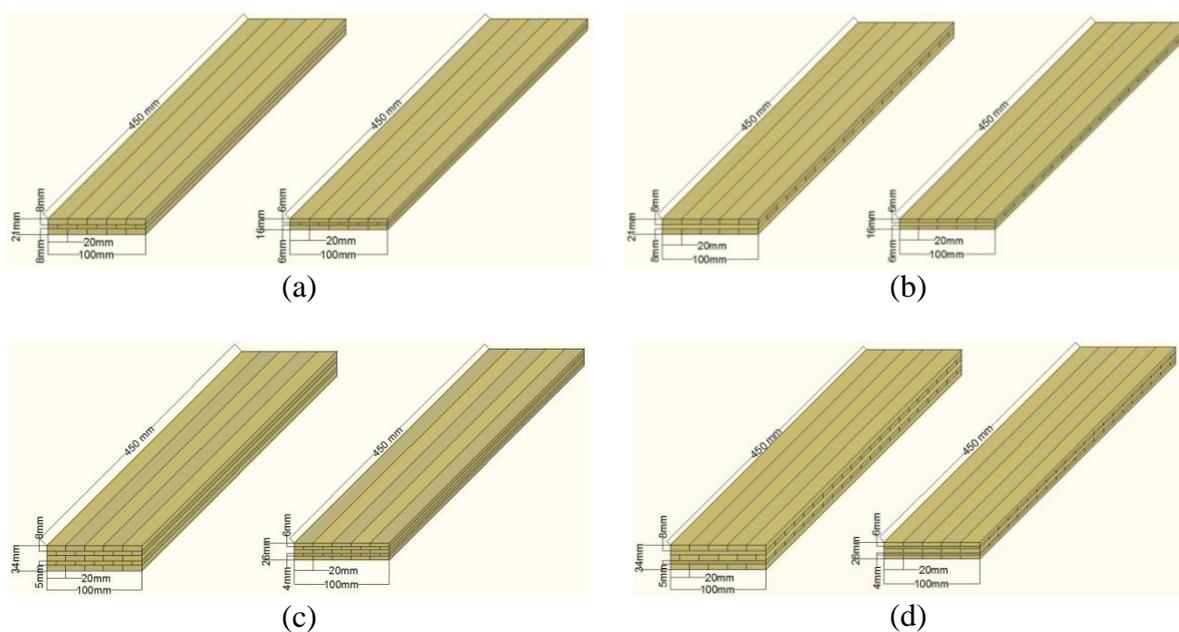


Figura 56 – VBLC<sub>0°</sub> produzidos com 3 (a) e 5 (c) camadas e VBLC<sub>0°/90°</sub> e aplainado produzidos com 3 (b) e 5 (d)

#### 3.4.3.4.1.1 Montagem das Vigas simples

As vigas de bambu laminado colado “0°” de 3 camadas (<sup>3</sup>VBLC<sub>0°</sub>) foram constituídas por três camadas de um único tipo de painel (PBLC<sub>0°</sub>) que desencontravam-se entre si. As vigas de bambu laminado colado “0°/90°” de 3 camadas (<sup>3</sup>VBLC<sub>0°/90°</sub>) eram do tipo cruzado, ou seja, foram constituídas pelos dois tipos de painéis produzidos, sendo duas camadas (1 e 3) de

PBLC<sub>0°</sub> e uma camada de PBLC<sub>90°</sub> (camada central). As vigas de bambu laminado colado “0°” de 5 camadas (<sup>5</sup>VBLC<sub>0°</sub>) eram constituídas somente com camadas de PBLC<sub>0°</sub> e, as vigas de bambu laminado colado “0°/90°” de 5 camadas (<sup>5</sup>VBLC<sub>0°/90°</sub>) eram formadas por 3 camadas (1, 3 e 5) de PBLC<sub>0°</sub> e 2 camadas (2 e 4) de PBLC<sub>90°</sub>. O esquema de montagem das vigas <sup>3</sup>VBLC<sub>0°</sub> e <sup>3</sup>VBLC<sub>90°</sub> para a condição não aplainada (a) e (c) e aplainada (b) e (d) pode ser observado na Figura 57.

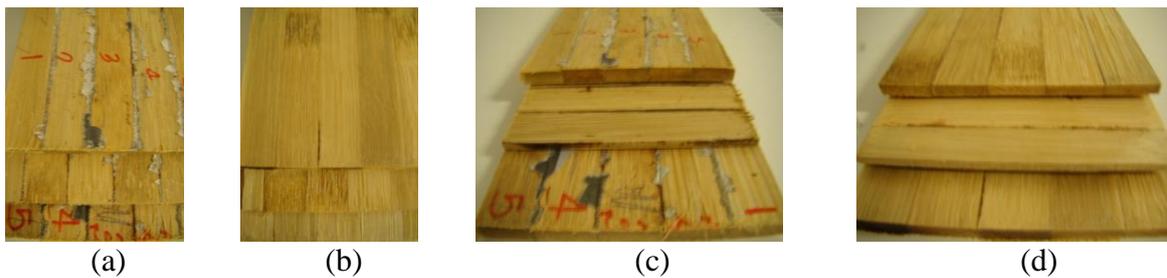


Figura 57 – Esquema de montagem dos painéis de 3 camadas <sup>3</sup>BLC<sub>0°</sub> não aplainado (a) e aplainado (b) e, <sup>3</sup>BLC<sub>90°</sub> não aplainado (c) e aplainado (d)

Antes de efetuar o corte transversal para reduzir o comprimento dos painéis, anotou-se nas extremidades de suas faces, um número, para possibilitar identificação e reagrupamento posterior. Esse procedimento foi feito para possibilitar que as VBLC não fossem compostas com camadas oriundas do mesmo PBLC. Os números representativos dos PBLC foram sorteados e as VBLC montadas seguindo a ordem do sorteio. O procedimento de colagem foi o mesmo adotado para os 8 tipos de VBLC. O adesivo foi aplicado com auxílio de um pincel nas duas faces do PBLC, exceto para os painéis de superfícies das vigas, que foram unidas imediatamente após a aplicação (Figura 58).

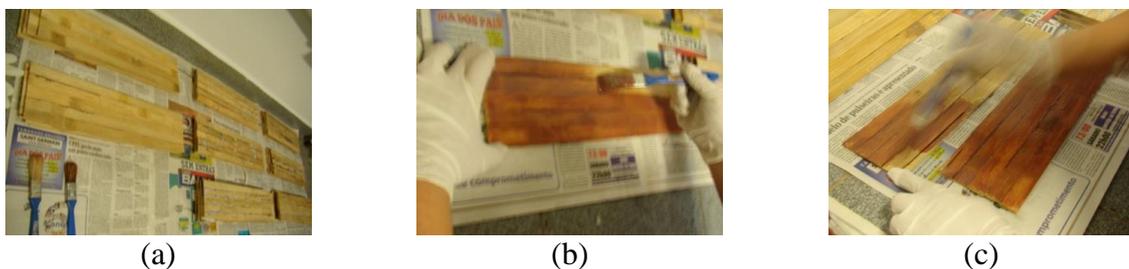


Figura 58 – Montagem dos painéis de acordo com os números sorteados (a) aplicação do adesivo em uma das faces do PBLC da 1ª camada (b) e na face de contato da 2ª camada (c)

Para as <sup>3</sup>VBLC aplicou-se adesivo em uma das faces PBLC da camada 1, nas duas faces do PBLC da camada 2 e, em uma das faces do PBLC da camada 3. Para as <sup>5</sup>VBLC aplicou-se

adesivo em uma das faces do PBLC da camada 1, nas duas faces dos PBLC das camadas 2, 3 e 4 e em uma das faces do PBLC da camada 5. Oito painéis foram posicionados em uma fôrma de madeira forrada com jornal que foi fechada imediatamente e conduzida para o processo de prensagem, utilizando-se uma prensa hidráulica com um ponto central de carga conduzido a aplicar 2 MPa de pressão. Os painéis foram armazenados em ambiente com temperatura controlada por 10 dias. Os processos de colagem e prensagem foram repetidos três vezes para cada lote de 8 painéis. Ao todo foram feitas 3 repetições por tratamento. O esquema de montagem das vigas na fôrma de prensagem é mostrado na Figura 59.

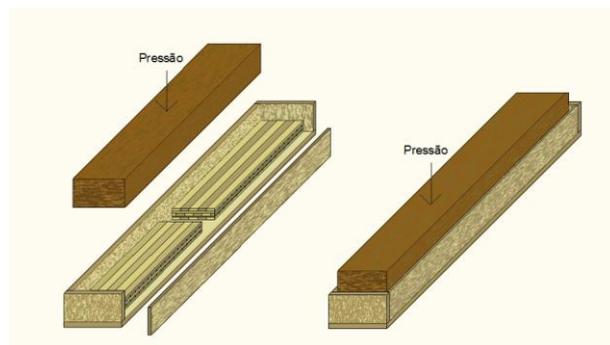


Figura 59 – Esquema idealizado para prensar 8 painéis simultaneamente

### 3.4.3.5 Viga I

A viga I foi composta por 3 vigas  $VBLC_{0^\circ/90^\circ}$  sendo 2 mesas de 3 painéis de bambu laminado colado (PBLC) ligadas entre si pela alma de 5 PBLC. Os painéis eram compostos de lâminas coladas pelas bordas e que trabalham como placas horizontais nas mesas (posição “*flat*”) e como placas verticais na alma (posição “*edge*”). A característica “*cross*” das vigas  $VBLC_{0^\circ/90^\circ}$  é dada pela sobreposição de painéis orientados transversalmente em relação aos painéis adjacentes.

#### 3.4.3.5.1 Painéis individuais de composição da viga I

O processo de produção dos painéis  $PBLC_{0^\circ}$  e  $PBLC_{90^\circ}$  foi o mesmo adotado no item 3.4.3.4.1 (Produção dos painéis individuais do tipo  $PBLC_{0^\circ}$  e  $PBLC_{90^\circ}$  para viga simples), diferindo apenas quanto à origem do material (Bauru) e as espessuras das lâminas. Para compor cada  $PBLC_{0^\circ}$  da mesa da viga, utilizou-se 5 lâminas de bambu de 10 mm e 8 mm de espessura e, para compor cada  $PBLC_{0^\circ}$  da alma da viga, utilizaram-se 6 lâminas com as mesmas dimensões. Os painéis  $PBLC_{90^\circ}$  foram fabricados com 45 lâminas de 5 mm de espessura. Para

os painéis das mesas das vigas o comprimento das lâminas foi de 100 mm e o das almas de 180 mm. O procedimento de colagem foi o mesmo adotado para ambos os tipos de PBLC e a pressão aplicada foi de 1 MPa. Para aplicação da carga de forma uniformemente distribuída em todo o comprimento do painel foi utilizada uma peça de transição para a transferência da força aplicada que é do tipo puntual. Os painéis prontos foram armazenados em ambiente com temperatura e umidade controladas durante 30 dias. A Figura 60 refere-se a algumas etapas de fabricação dos PBLC<sub>0°</sub> e PBLC<sub>90°</sub> para alma da viga.

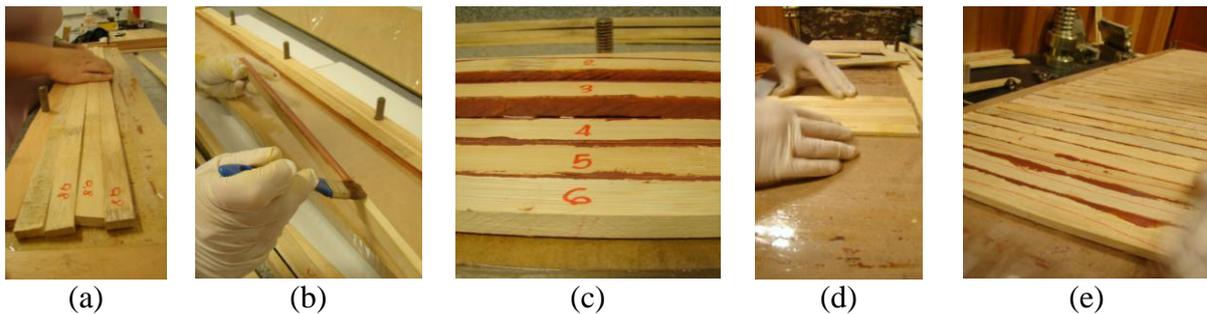


Figura 60 – Fabricação dos painéis da alma iniciando com a seleção das lâminas para manufatura do PBLC<sub>0°</sub> (a), aplicação do adesivo em uma das bordas das lâminas (b) e posicionamento das lâminas com o adesivo dentro de uma das superfícies da fôrma (c) antes de ser fechada e, seleção das lâminas do PBLC<sub>90°</sub> (d) e com adesivo (e)

#### 3.4.3.5.1.1 Reprocessamento mecânico das superfícies e ajustes dos painéis individuais

Para que as camadas tivessem pleno contato da área de colagem entre uma e outra, os painéis seguiram para o reprocessamento mecânico para uniformização das espessuras e bordas. Para ajustar as espessuras dos painéis de tipo PBLC<sub>0°</sub> utilizou-se plaina desgrossadeira e, para ajustar às dos painéis PBLC<sub>90°</sub>, utilizou-se uma lixadeira desgrossadeira. Os painéis manufaturados na espessura de 10 mm foram ajustados para 8 mm e, os painéis de 8 mm de espessura foram redimensionados para 6 mm. Os painéis PBLC<sub>90°</sub> manufaturados com 5 mm de espessura após o ajuste de espessura passaram a ter 4 mm. Na Figura 61, observa-se o processo mecânico utilizado para regularização das espessuras dos painéis componentes das vigas.



Figura 61 – Ajuste das espessuras de um dos painéis do tipo  $PBLC_{0^\circ}$  na plaina desempenadeira (a) e de um dos painéis do tipo  $PBLC_{90^\circ}$  na lixadeira desgrossadeira (b)

Posteriormente, ambos os tipos de painéis tiveram as larguras e os comprimentos ajustados. Para ajustar os comprimentos dos  $PBLC$  utilizou-se uma serra circular e, para ajustar as larguras, inicialmente ajustou-se uma das bordas do  $PBLC_{0^\circ}$  na plaina desempenadeira, a qual serviu de guia para ajustar a outra borda na serra circular e, para ajustar a largura dos painéis  $BLC_{90^\circ}$  utilizou-se somente a serra circular. Todos os painéis que compunham as mesas foram redimensionados para 97 mm de largura e 900 mm de comprimento, e os painéis que compunham as almas das vigas foram redimensionados por duas medidas de larguras diferentes, ou seja, os painéis  $BLC_{0^\circ}$  foram redimensionados com 116 mm de largura e, os painéis  $BLC_{90^\circ}$  com 130 mm. Os ajustes nas dimensões dos painéis  $PBLC_{0^\circ}$  e  $BLC_{90^\circ}$  que compunham a viga de perfil I são mostrados na Figura 62.

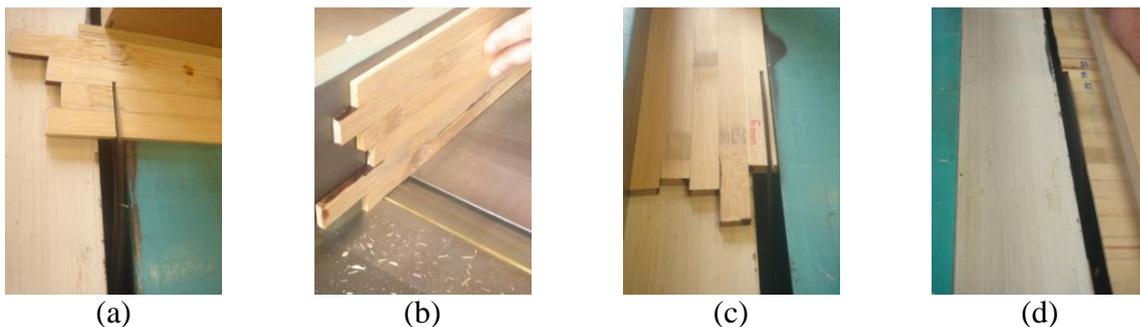


Figura 62 – Ajuste do comprimento de um dos  $PBLC_{0^\circ}$  (a), da largura na plaina desempenadeira (b) e na serra circular (c) e ajuste da largura do  $PBLC_{90^\circ}$  na serra circular (d)

#### 3.4.3.5.2 Produção das mesas

Para compor as mesas de três camadas utilizaram-se três painéis  $PBLC$ , sendo os das extremidades do tipo  $PBLC_{0^\circ}$  e o da camada central do tipo  $PBLC_{90^\circ}$ . A manufatura do painel foi executada de tal forma que permitiu que a montagem da mesa seguisse as combinações de

faces de contato adotadas no processo de colagem da presente pesquisa. Na 1ª camada de cada mesa aplicou-se adesivo na face do painel  $PBLC_{0^\circ}$  que foi formado pelas faces internas das lâminas. Na 2ª camada, o adesivo foi aplicado na face do painel  $PBLC_{90^\circ}$  composta pelas faces externas das lâminas. A 2ª camada foi depositada sobre a 1ª camada, efetuando desta forma a colagem do tipo e=i (Figura 63 (a) e (b)). Em seguida aplicou-se adesivo na outra superfície do painel  $PBLC_{90^\circ}$  da 2ª camada (Figura 63 (c)), ou seja, na superfície composta pelas faces internas das lâminas, e em uma das superfícies do  $PBLC_{0^\circ}$  (Figura 63 (d)), as superfícies dos painéis foram unidas formando a 3ª camada que seguiu a composição de colagem do tipo i=i. Os painéis de 3 mesas foram posicionados em uma fôrma confinadora feita de compensado estrutural (Figura 63 (e)) e foram prensados sob 2 MPa de pressão (Figura 63 (f)). Produziram-se 6 mesas com painéis  $PBLC_{0^\circ}$  de 6 mm intercalados com painéis  $PBLC_{90^\circ}$  de 4 mm, e 6 mesas com painéis  $PBLC_{0^\circ}$  de 8 mm intercalados com painéis  $PBLC_{90^\circ}$  de 4 mm.

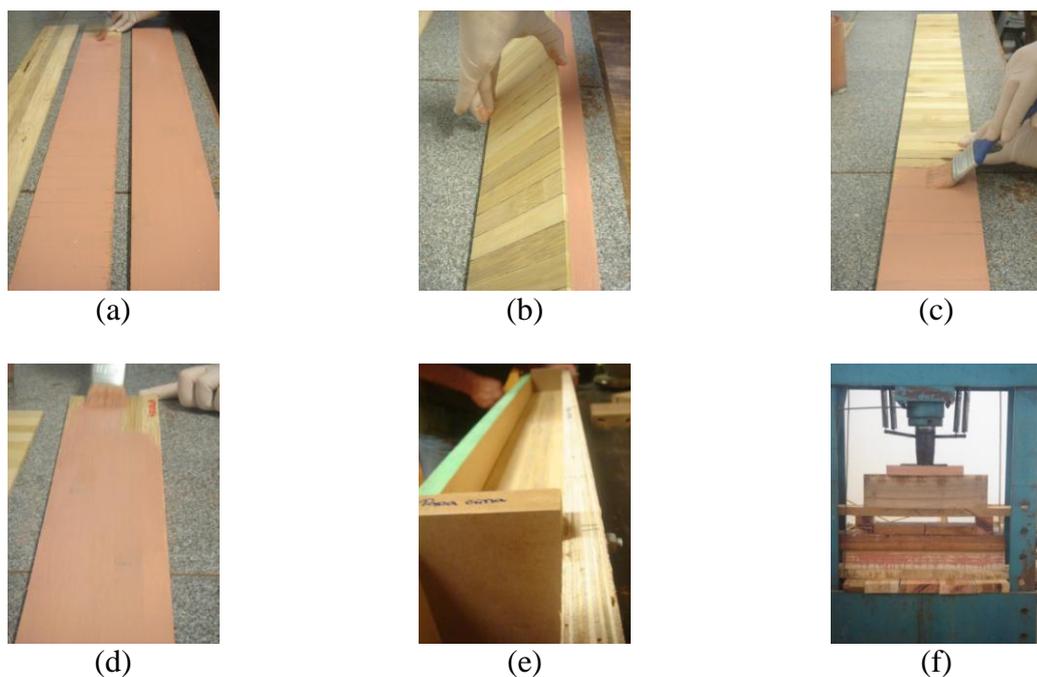


Figura 63 – Aplicação do adesivo em uma das faces do painel  $PBLC_{90^\circ}$  (a), que foi posicionado sobre o painel  $PBLC_{0^\circ}$  (b), aplicação do adesivo na outra face do painel  $PBLC_{90^\circ}$  (c) e em uma das faces do painel  $PBLC_{0^\circ}$  (d), os painéis dentro da fôrma (e) para serem prensados (f)

Após a produção das mesas esperou-se a cura do adesivo para serem encaminhadas novamente para o processo mecânico de produção dos elementos de ligação alma/mesa e para serem efetuados os ajustes laterais. Para ajustar a largura das mesas para 970 mm utilizou-se uma serra circular (Figura 64 (a)), uma das bordas ajustadas serviu como guia na tupia para

fazer a fenda central com 3 mm de profundidade (Figura 64 (b)) que teve a finalidade de engastar na mesa as 3 camadas dos PBLC<sub>0°</sub> da alma, além das 2 camadas dos PBLC<sub>90°</sub> que foram encaixadas nos cortes nas mesas efetuados com uma serra circular até a meia altura do PBLC<sub>90°</sub> (Figuras 64 (c) e (d)).

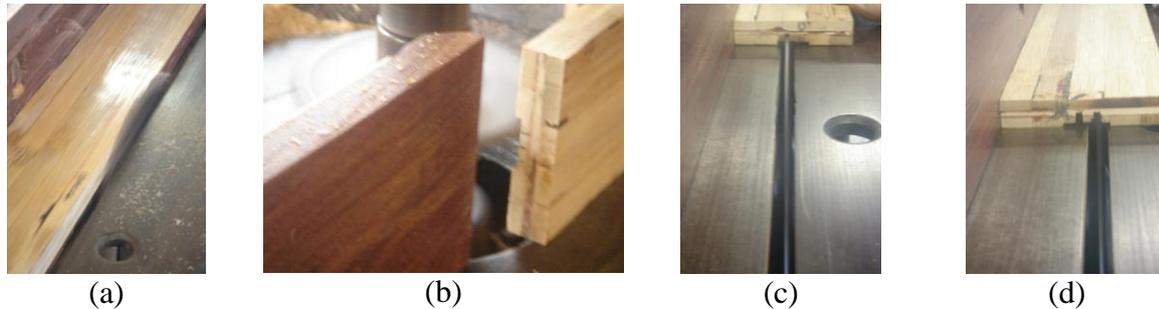


Figura 64 – Ajuste de uma das laterais da mesa com serra circular (a), corte feito com a tupa para o encaixe dos PBLC<sub>0°</sub> da alma na mesa (b) e, cortes do tipo fêmea executados com a serra circular na mesa

### 3.4.3.5.3 Produção das almas

Para compor as almas de cinco camadas utilizaram-se três painéis do tipo PBLC<sub>0°</sub> medindo 116 mm de largura, intercalados com outros dois do tipo PBLC<sub>90°</sub> medindo 130 mm de largura. A metodologia utilizada para produzir as almas foi praticamente a mesma aplicada para produzir as mesas, com exceção aos espaçadores colocados entre painéis e laterais da fôrma, os quais foram utilizados para garantir a integridade dos principais painéis de ligação mesa/alma, ou seja, os de tipo PBLC<sub>90°</sub>. Os painéis PBLC<sub>0°</sub> e PBLC<sub>90°</sub> foram unidos com o adesivo adotando-se as seguintes combinações de faces de contato para colagem: e=e entre a 1ª e 2ª camadas da alma, e=i entre a 2ª e 3ª camadas, i=i entre as 3ª e 4ª camadas, e=e entre a 4ª e 5ª camadas.

O início do processo se deu pela demarcação com caneta hidrográfica da área de colagem do painel de maior dimensão (Figura 65 (a)), o adesivo foi aplicado com auxílio de um pincel em uma das faces da primeira camada da alma (PBLC<sub>0°</sub>) (Figura 65 (b)) e, em uma das faces do painel PBLC<sub>90°</sub> (Figura 65 (c)), a 1ª camada (PBLC<sub>0°</sub>) foi inserida na fôrma juntamente com os espaçadores laterais Figura 65 (d)) e, a 2ª camada, a qual é formada pelo painel PBLC<sub>90°</sub>, foi depositada sobre ela (Figura 65 (e)), o adesivo foi espalhado na área de colagem demarcada do PBLC<sub>90°</sub> (Figura 65 (f)) e os espaçadores de madeira depositados sobre ele (Figura 65 (g)), ou seja, entre o PBLC<sub>0°</sub> da 3ª camada, onde na outra face aplicou-se o adesivo (Figura 65 (h)) e depositou-se a 4ª camada formada pelo painel do tipo PBLC<sub>90°</sub> com adesivo espalhado em

uma de suas faces (Figura 65 (i)), aplicou-se adesivo na outra face Figura 65 (j)) e imediatamente foi unida à 5ª camada através da superfície do PBLC<sub>0°</sub> com o adesivo aplicado (Figura 65 (l)), a fôrma foi fechada e conduzida para o processo de prensagem, onde utilizou-se 2 MPa de pressão, ou seja, 20 toneladas distribuídas ao longo de duas almas (Figura 65 (m)).

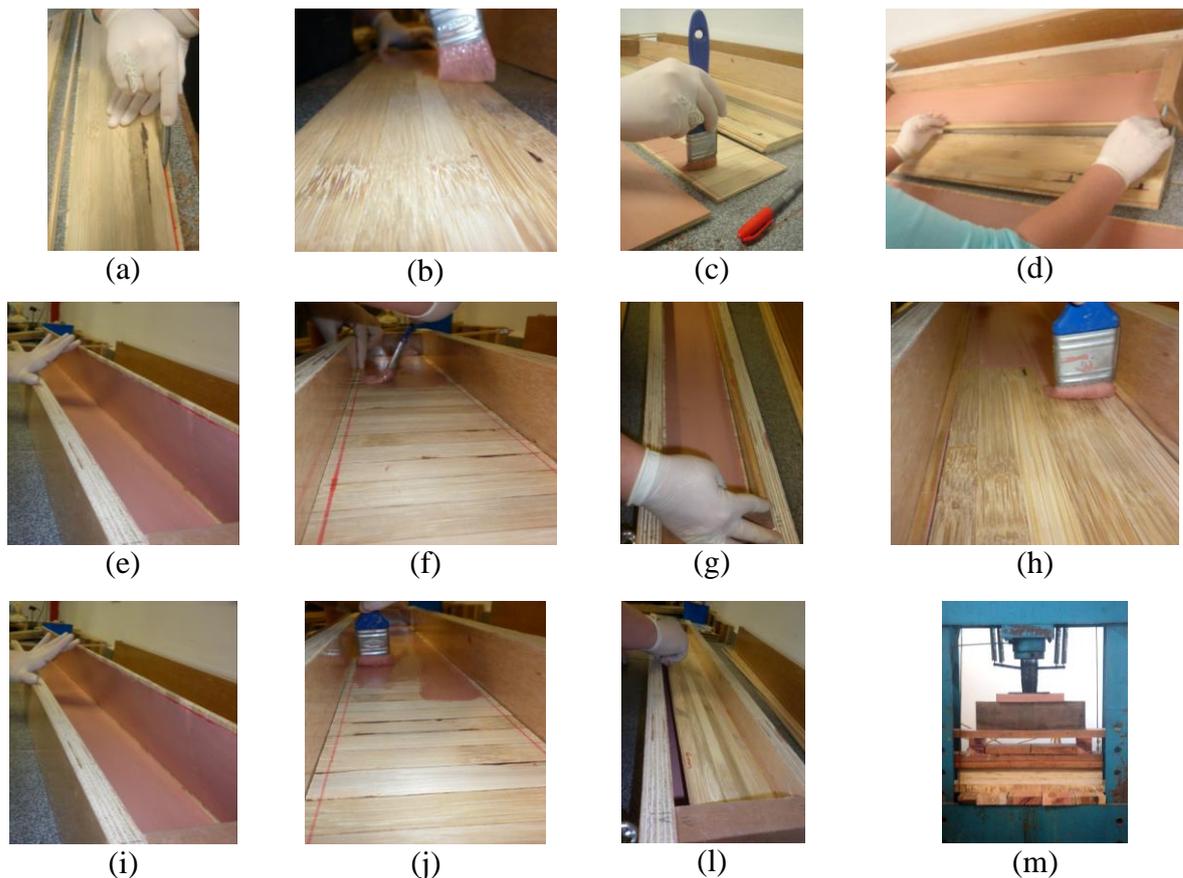


Figura 65 - Demarcação da área de colagem para os painéis BLC<sub>90°</sub> (a), aplicação do adesivo na superfície do painel BLC<sub>0°</sub> (b) e BLC<sub>90°</sub> (c), posicionamento da primeira camada da viga na fôrma (d), sobreposição da 2ª camada da alma sobre a 1ª (e) aplicação do adesivo na outra superfície da 2ª camada da alma (f), colocação dos espaçadores sobre a 2ª camada (g), aplicação do adesivo na superfície da camada (h), sobreposição da 4ª camada na 3ª camada (i), aplicação do adesivo (j), sobreposição da 5ª camada da alma (l) e a prensagem (m)

Após cura do adesivo (10 dias) as almas foram conduzidas para o processamento mecânico com o intuito de ajustar as alturas das camadas 1, 3 e 5 da alma, ou seja, aquelas formadas pelos painéis de tipo PBLC<sub>0°</sub> que ficaram em contato direto com as fendas centrais das mesas e, que serviram de guia para o engaste das camadas 2 e 4, formadas por painéis do tipo PBLC<sub>90°</sub> responsáveis pela ligação mesa/alma. Os ajustes das alturas das camadas foram efetuados com o auxílio de uma tupa (Figura 66).

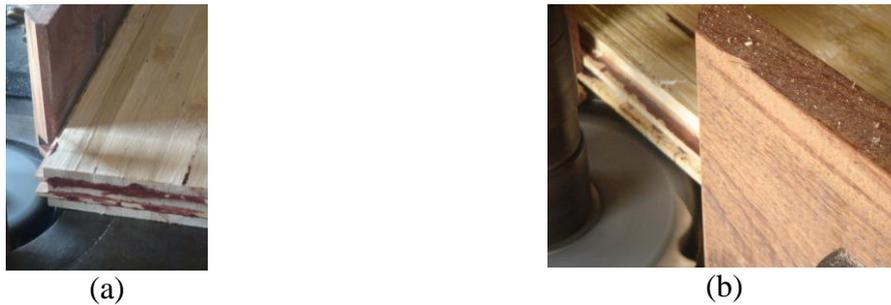


Figura 66 – Ajuste da primeira camada utilizando uma tupa (a) e (b)

#### 3.4.3.5.4 Ligação mesa/alma

O processo iniciou-se com a aplicação do adesivo em uma das extremidades da alma e por sua extensão. Em seguida, aplicou-se o adesivo na fenda central e nos dois cortes do tipo fêmea da mesa, a qual imediatamente foi unida à extremidade da alma onde se aplicou o adesivo, repetindo-se o procedimento de colagem para unir a outra extremidade da alma na segunda mesa. O conjunto de três peças foi conduzido para a fôrma feita para a prensagem de viga I, encaixando-se uma das mesas entre as duas guias de madeira da base da fôrma. Em seguida, as camadas 2 e 4 de uma das extremidades da alma foram inseridas nos cortes do tipo fêmea da mesa. Na outra extremidade longitudinal da alma adotou-se mesmo procedimento, os cortes do tipo fêmea da mesa foram colocados em contato com as camadas 2 e 4 da alma. A mesa foi encaixada entre duas guias de madeira colocadas na superfície da fôrma de prensagem. Aplicou-se pressão de 2 MPa que foi distribuída a partir de um ponto central de aplicação de carga por toda a viga I de bambu laminado colado (VBLC). O processo de colagem e prensagem de uma das vigas de perfil I é mostrado na Figura 67.

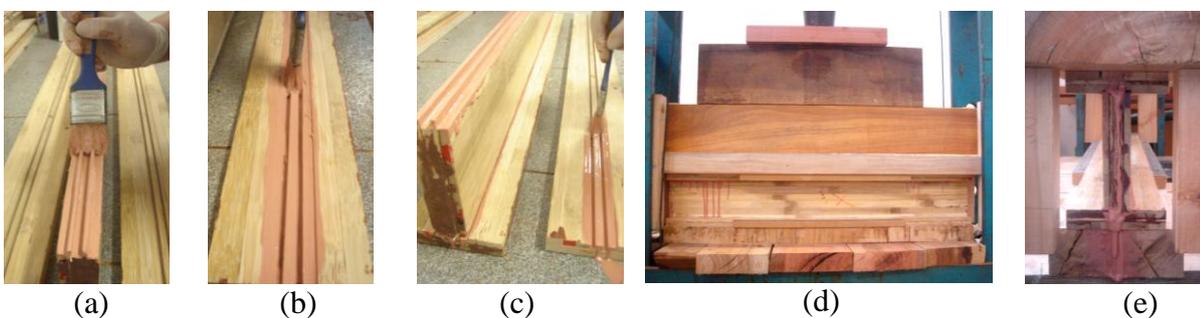


Figura 67 – Aplicação do adesivo em uma das extremidades da alma (a), na região de ligação de uma das mesas (b) e na outra mesa para ser unida à outra extremidade da alma (c) o conjunto foi prensado (d) e expulsão de parte do adesivo no momento de prensagem (e)

#### **3.4.3.5.5 Análises estatísticas**

Todas as análises estatísticas efetuadas, tanto pelo SAS quanto pelo SISVAR, seguiram o delineamento inteiramente casualizado segundo esquemas fatoriais de diferentes níveis. Podem ser entendidas diretamente na observação dos gráficos produzidos, nos quais se visualizam as comparações de médias efetuadas. As letras acima das barras referem-se às significâncias e os índices dessas letras referem-se aos grupos de médias em comparação.



## **4 RESULTADOS E DISCUSSÃO**

### **4.1 Cisalhamento radial longitudinal**

A transformação do bambu em produto processado acarreta importantes modificações em suas propriedades mecânicas. No caso da presente pesquisa, onde ripas foram transformadas em lâminas tanto nodais como internodais, houve melhoria de resistência ao cisalhamento do material, especialmente para as amostras nodais. Neste contexto, o trabalho avaliou a resistência ao cisalhamento radial de lâminas e ripas de bambu nodal e internodal.

Ao se utilizar o bambu como principal material estrutural faz-se necessário efetuar o travamento da estrutura através de ligações que atuam como peças importantes. Para executar uma ligação entre colmos é imprescindível perfurar o colmo na direção radial para inserir elemento de ligação, como por exemplo, um parafuso, e dependendo do esforço sofrido neste ponto da ligação ela estará sujeita ao cisalhamento, que é uma propriedade de resistência crítica para o bambu e esta diretamente relacionada com a sua anatomia.

Os resultados comprovaram que há diferença significativa entre o tipo de material (ripa e lâmina) e entre a qualidade (nodal e internodal).

#### **4.1.1 Ripa**

Na Figura 68, apresentam-se os resultados de resistência ao cisalhamento radial para cada repetição e as médias das ripas dentro das qualidades nodal e internodal. Nota-se que houve uma considerável variação entre as repetições, induzindo a dizer que o bambu é um material de ampla variabilidade. Essa variação de resistência mecânica é decorrente da heterogeneidade anatômica dentro e entre colmos e touceiras, e ainda em relação à altura (base, meio ou topo) de onde foi retirada a amostra. Nas repetições internodais resistência ao cisalhamento variou de 3,77 MPa a 18,94 MPa e nas nodais de 4,26 MPa a 16,33 MPa.

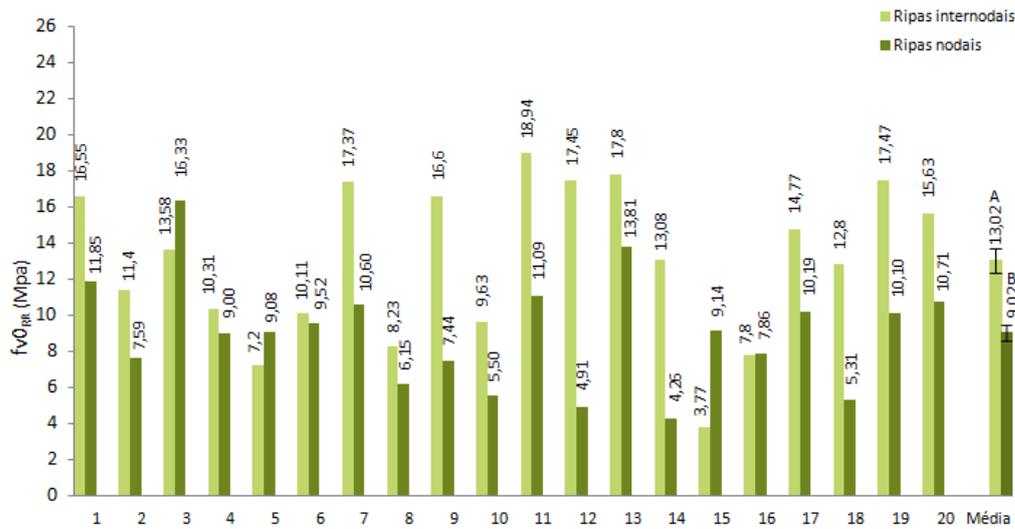


Figura 68 – Resistência ao cisalhamento radial ( $fv_{0RR}$ ) de ripas internodais e nodais (b) de bambu

De uma forma geral, as ripas internodais apresentaram maior resistência ao cisalhamento radial longitudinal do que as nodais. O arranjo anatômico da região internodal do colmo difere drasticamente da nodal, pois os feixes de fibras na seção longitudinal da região nodal se posicionam tanto axialmente como transversalmente. Esse arranjo prejudica a capacidade de suportar a carga quando comparada com a região internodal que é favorecida pela disposição uniforme dos feixes de fibras. Observa-se, na Figura 69, a diferença anatômica no plano transversal entre a região internodal (a) e nodal (b) das ripas, onde os feixes de fibras da região internodal apresentam-se organizados, enquanto que na região nodal ocorre o oposto.



Figura 69 – Arranjo anatômico da região internodal (a) e nodal (b) da ripa de bambu

Dentro das amostras internodais, a repetição 15 foi a que apresentou a menor resistência ao cisalhamento radial e ao analisar o mecanismo da ruptura no microscópio estereoscópico, para essa amostra observou-se que a mesma ocorreu fora da área teoricamente planejada (Figura

70). Um dos motivos para ocorrência desse tipo de ruptura se refere a um desvio que imperceptivelmente acontece entre a orientação do plano de clivagem natural, que depende da direção das fibras e o plano teoricamente planejado para a ruptura, como observou-se na Figura 70. Não é raro a ruptura ocorrer no plano de menor resistência, no caso do corpo de prova da repetição 15 a ruptura migrou do tecido fibroso para o tecido parenquimático contornando alguns feixes de fibras e passando por alguns vasos e floema, como se vê nas Figuras 70 (b) e (c).

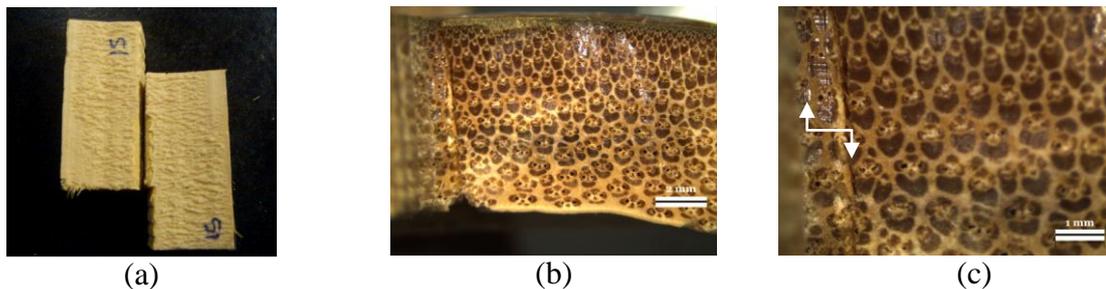


Figura 70 – Corpo de prova rompido por cisalhamento no plano de clivagem natural ligeiramente desorientado em relação ao plano programado (a) e a linha de ruptura vista no plano transversal também inclinada em relação à suposta direção radial (b); sinalizado por flechas o plano de ruptura teoricamente planejado e o ocorrido de fato

As repetições internodais apresentaram consistentemente melhores resultados de resistência ao cisalhamento radial, atingindo o valor de 18,94 MPa contra o de 16,33 MPa das repetições nodais. Notou-se que as repetições mais resistentes romperam nas regiões com sequência frequente de feixes de fibras, como sinalizado nas Figuras 71 (b) e (d), que são referentes às repetições 11 e 12, respectivamente.

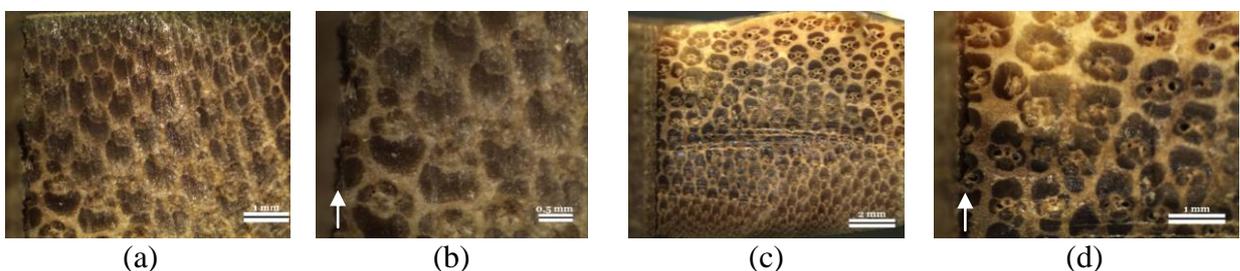


Figura 71 – Corpo de prova da repetição 11 rompido por cisalhamento no plano de clivagem programado (a) e a linha de ruptura vista no plano transversal da imagem ampliada (b), ruptura do corpo de prova da repetição 12 na área de clivagem programada (c) e ampliação de 20 vezes da linha de ruptura em região fibrosa (d)

A resistência ao cisalhamento radial mostra relação direta com a frequência de feixes de fibras no plano de ruptura. Quando o plano de ruptura ocorre no tecido parenquimático, a resistência

do corpo de prova é menor do que quando o mesmo ocorre no tecido fibroso. Na Figura 72, observa-se que a ruptura ocorreu praticamente numa linha de feixes de fibras, resultando em um dos mais elevados valores de resistência ao cisalhamento radial dentro das repetições, ou seja, 17,45 MPa.

As rupturas de ripas oriundas da região nodal não foram retilíneas e foram diretamente influenciadas pelo arranjo anatômico desta região, onde há uma descontinuidade e desvio dos feixes de fibras vindos da região internodal. A resistência ao cisalhamento de corpos de prova com nó oscilou entre 4,26 e 16,33 MPa mas a variabilidade foi menor do que a observada na amostra de corpos de prova internodais. A repetição 3 apresentou a maior resistência ao cisalhamento radial. As Figuras 72 referem-se ao corpo de prova nodal da repetição 3, notou-se que em uma das extremidades do corpo de prova, no plano transversal (Figuras 72 (a) e (b)) a ruptura seguiu contornando alguns feixes de fibras longitudinais, como apontado na Figura 72 (b). E na outra extremidade do corpo de prova, também no plano transversal (Figuras 72 (c) e (d)), a ruptura ocorreu em um feixe de fibra radial, sinalizado pela fecha na Figura 72 (d).

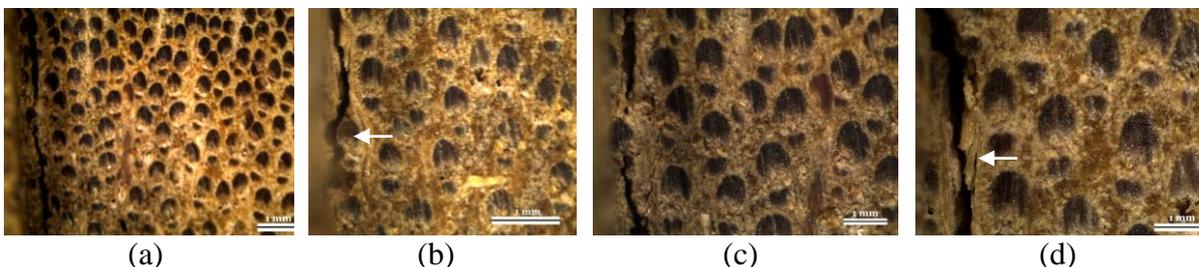


Figura 72 – Corpo de prova da repetição 3 rompido por cisalhamento visto no plano transversal de uma das extremidade (a) e a linha de ruptura contornando feixe de fibras longitudinais (b), na outra extremidade a linha de ruptura (c) é ampliada mostrando a ruptura na região fibrosa (d)

Na repetição 13 nodal a ruptura não seguiu de forma retilínea como observada na Figura 73 (a), onde notou-se que a ruptura foi além da área teoricamente planejada para cisalhar. Observou-se, na Figura 73 (b), que a ruptura passou pelo o centro de alguns feixes de fibras que não se romperam ao meio e foram quase que totalmente descolados do tecido parenquimático, como apontados pelas as setas na Figura. Esses feixes de fibras deslocados foram responsáveis pelo acréscimo da área planejada para cisalhar, como vistos e apontados na Figura 73 (c). Ao analisar o outro lado do corpo de prova observou-se que a ruptura não ocorreu de modo retilíneo (Figura 73 (d)). Percebeu-se, na Figura 73 (e), que a ruptura seguiu para o tecido parenquimático, já que na área planejada para romper haviam trechos com

sequências de feixes de fibras. Notou-se, na Figura 73 (f), o plano tangencial longitudinal do corpo de prova na posição exata da área cisalhada.

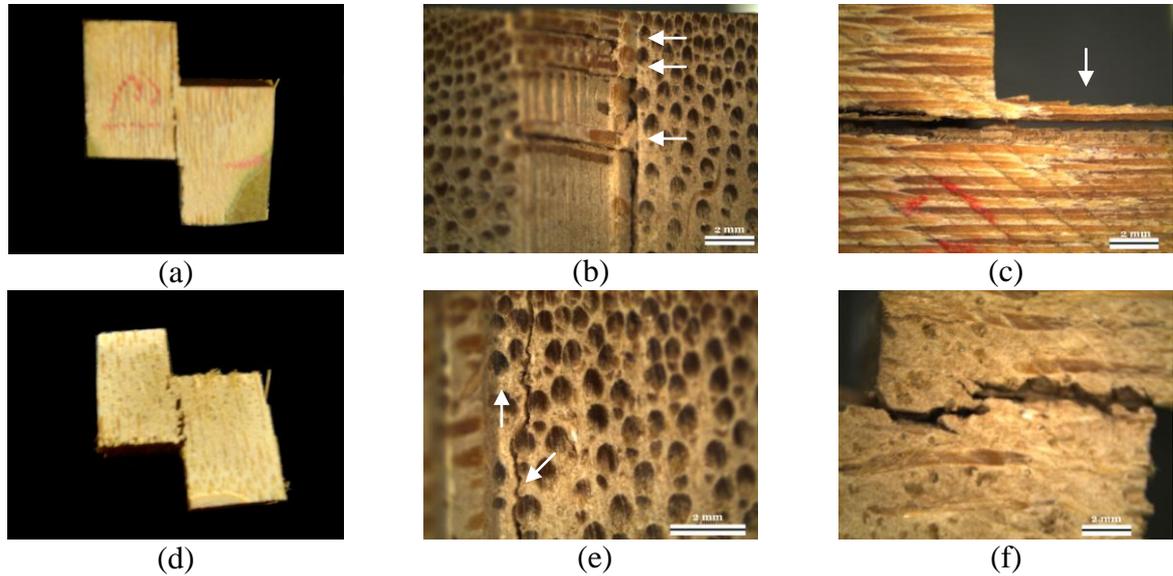


Figura 73 – Corpo de prova nodal da repetição 13 rompido por cisalhamento (a), área cisalhada com as fibras intactas à ruptura (b) e vista no plano tangencial (c), corpo de prova no plano tangencial da face que estava mais próxima à cavidade do colmo antes do processamento do corpo de prova (d), linha de ruptura no tecido parenquimático (e), e linha de ruptura não retilínea no plano tangencial (f)

Nos corpos de prova com baixa resistência notou-se que a ruptura ocorreu no tecido parenquimático, muitas vezes contornando os feixes de fibras. Na Figura 74, observou-se que em ambas as extremidades do corpo de prova da repetição 12 a ruptura desviou-se do plano fibroso para o tecido parenquimático, como sinalizado por flechas. O mesmo desvio de ruptura ocorreu também com o corpo de prova da repetição 18 mostrado na Figura 75.

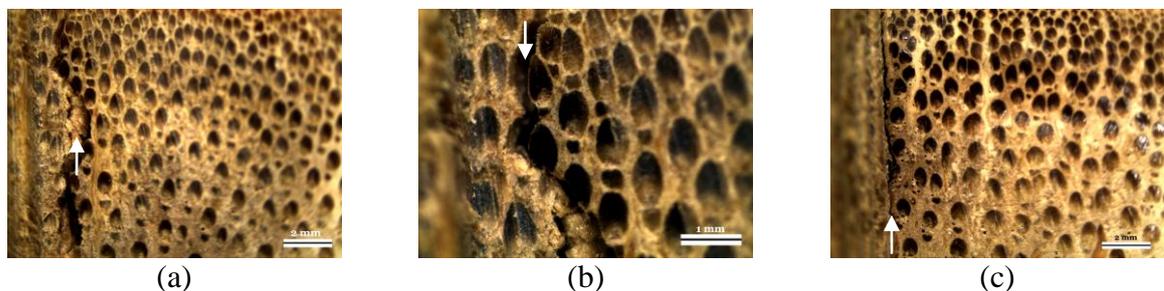


Figura 74 – Corpo de prova da repetição 12 cisalhado fora do plano de clivagem programado (a), ampliação da linha de ruptura contornando os feixes de fibras (b) e linha de ruptura na outra extremidade do corpo de prova (c)

Na Figura 75 (a) e (b), em ambas as extremidades do corpo de prova a ruptura ocorreu na região do tecido parenquimático e houve o contorno de todos os feixes de fibras do corpo de prova (Figura 75 (b)). No plano tangencial do corpo de prova, notou-se que a linha de ruptura desviou-se do plano de clivagem programado e que a ruptura ocorreu entre os feixes de fibras (Figura 75 (c)).

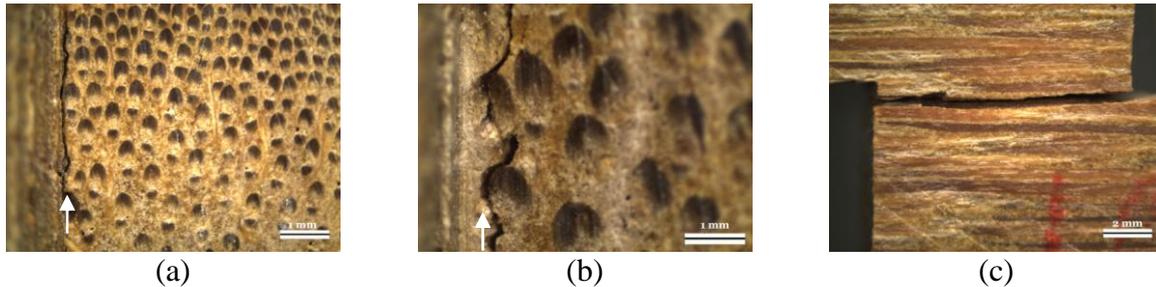


Figura 75 – Corpo de prova 18 com a linha de ruptura exatamente no plano projetado (a), a linha de ruptura contornando os feixes de fibras da outra extremidade do corpo de prova (b) e no plano tangencial a linha de ruptura tangenciando os feixes de fibras (c)

De acordo com os exemplos de ruptura apresentados, percebeu-se que o arranjo anatômico encontrado nas distintas regiões pode explicar os tipos de clivagem encontrados nos corpos de prova nodais e internodais. Na Figura 76, apresenta-se um resumo dos tipos de rupturas encontrados nas ripas internodais e nodais. Notou-se que as linhas de ruptura nas repetições internodais foram praticamente retilíneas (Figuras 76 (a) e (b)) enquanto que nas nodais as linhas de rupturas se apresentaram de forma tortuosa (Figuras 76 (c) e (d)). Pode se deprender que as rupturas geralmente seguem a grã do bambu.

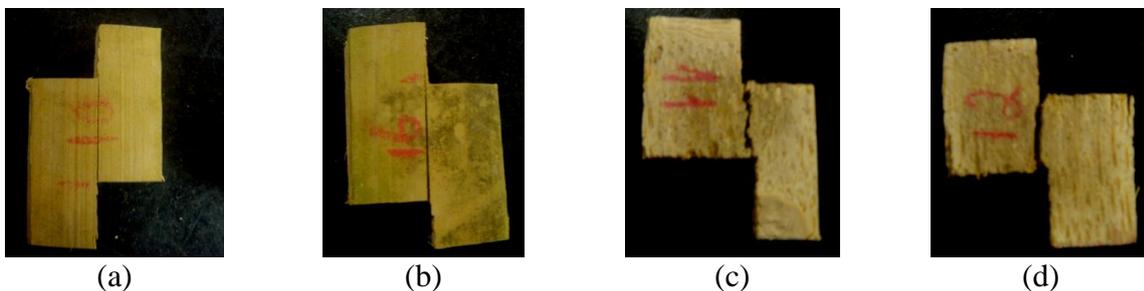


Figura 76 – Formas de ruptura dos corpos de prova internodais (a) e (b) e nodais (c) e (d)

Os dados de resistência ao cisalhamento e a comparação entre médias de resistência ao cisalhamento radial das camadas interna e externa da parede do colmo, nas condições internodal e nodal, são apresentados na Figura 77.

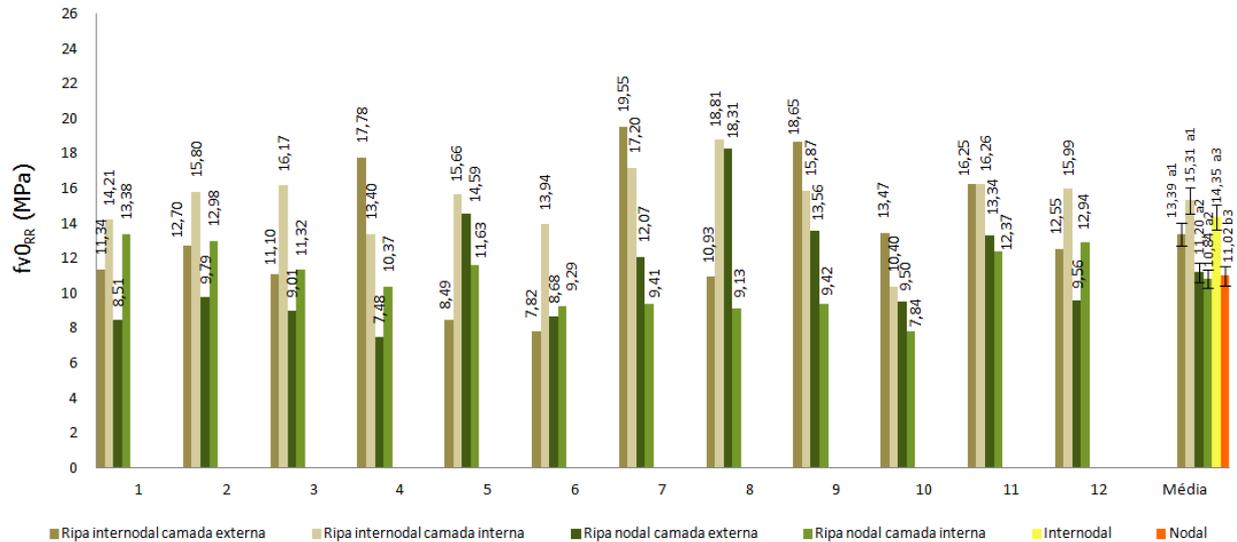


Figura 77 – Resistência ao cisalhamento radial ( $fv_{0RR}$ ) das camadas interna e externa da ripa bruta

Notou-se que a resistência ao cisalhamento radial das repetições das camadas internas e externas, nodais e internodais das ripas apresentaram variações. Não houve diferença significativa entre as camadas, mas houve entre a condição internodal e nodal. A comparação com o material processado é aproximada, pois ao transformar a ripa em lâmina, rejeitam-se alguns milímetros das camadas interna e externa, fazendo com que o material processado seja proveniente de uma região não exatamente igual às das camadas estudadas no presente trabalho. Os dados indicaram que a condição internodal da camada interna é ligeiramente mais resistente que a internodal externa, porém estatisticamente possuem o mesmo comportamento de resistência ao cisalhamento. A Figura 78 mostra os corpos de prova das camadas interna e externa da parede da ripa.



(a)



(b)

Figura 78 – Corpo de prova da camada externa (a) e da camada interna (b) da ripa internodal

A repetição 9 foi uma das que mais resistiu ao cisalhamento; a clivagem do corpo de prova da camada externa internodal ocorreu de forma completa, como observado na Figura 79 (a). No plano transversal percebeu-se que a linha de ruptura ocorreu exatamente no plano de

projetado para o cisalhamento, como observado e apontado por seta na Figura 79 (b). Na Figura 79 (c), observou-se que a linha de ruptura ocorreu em uma sequência de fibras, como indicado na Figura.

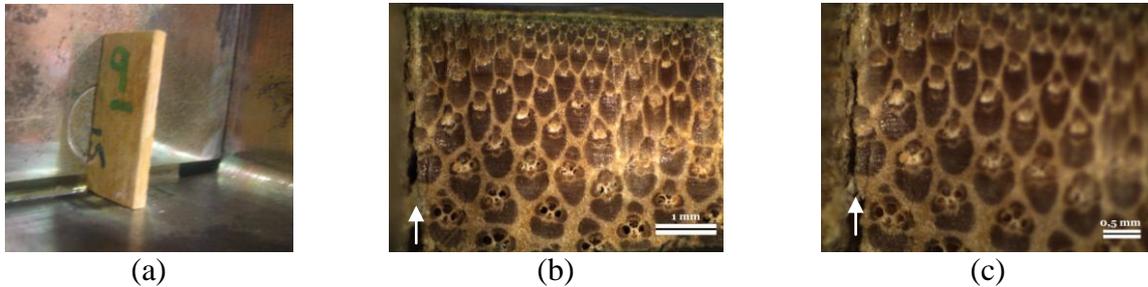


Figura 79 – Corpo de prova da repetição 9 no momento da ruptura ao cisalhamento radial (a) vista no plano transversal (b) com detalhe da ruptura nos feixes de fibras (c)

A repetição 6 foi a que apresentou menor resistência ao cisalhamento radial longitudinal na condição internodal da camada externa. A Figura 80 (a) refere-se ao corpo de prova da mencionada repetição no momento do ensaio, notando-se, na Figura 80 (b), no plano tangencial, que a ruptura ocorreu no tecido parenquimático com a linha de ruptura tangenciando os feixes de fibra, como pode ser melhor observado na Figura 80 (c).

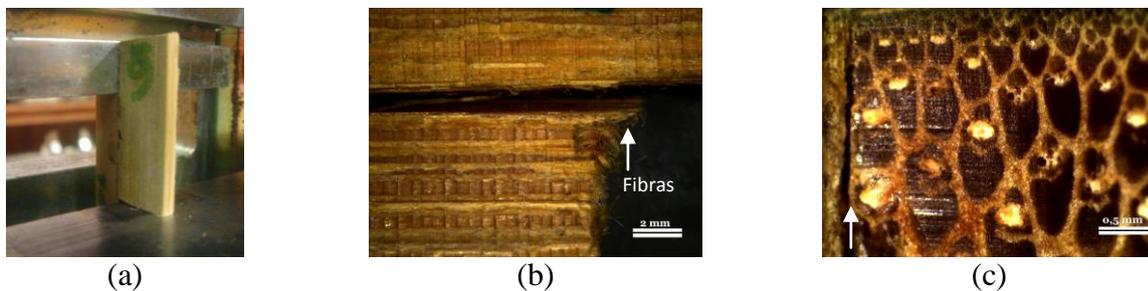


Figura 80 – Corpo de prova da repetição 6 sendo carregado ao cisalhamento (a), linha de ruptura no plano tangencial longitudinal (b) e linha de ruptura no plano transversal (c)

A repetição 7 foi uma das que mais resistiu ao esforço de cisalhamento (17,20 MPa) na qual a clivagem da camada interna internodal ocorreu de forma completa. A Figura 81 (a) refere-se ao corpo de prova no instante do carregamento ao cisalhamento, notando-se que a ruptura ocorreu na sequência de feixes de fibras, como mostram as Figuras 81 (b) e (c).

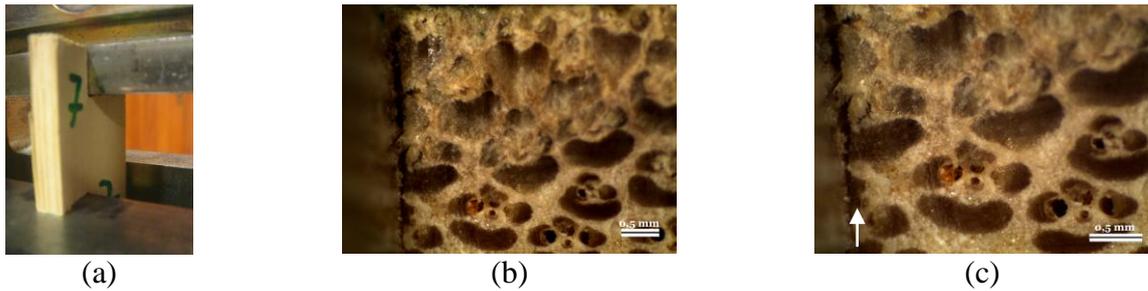


Figura 81 – Corpo de prova da repetição 7 no instante do ensaio de cisalhamento radial longitudinal, com a linha de ruptura na seção transversal (b) cortando feixes de fibras (c)

Outra repetição que apresentou bom desempenho mecânico (16,26 MPa) foi a de número 11, na qual se pôde observar que a ruptura do corpo de prova ocorreu de forma sinuosa em dois pontos, e em ambos os pontos as rupturas ocorreram praticamente nas fibras. A Figura 82 mostra o corpo de prova da repetição no momento do ensaio de resistência ao cisalhamento (a), a clivagem total do corpo de prova (b) e a imagem do plano transversal do corpo de prova com setas apontando a ruptura nos feixes de fibras(c).

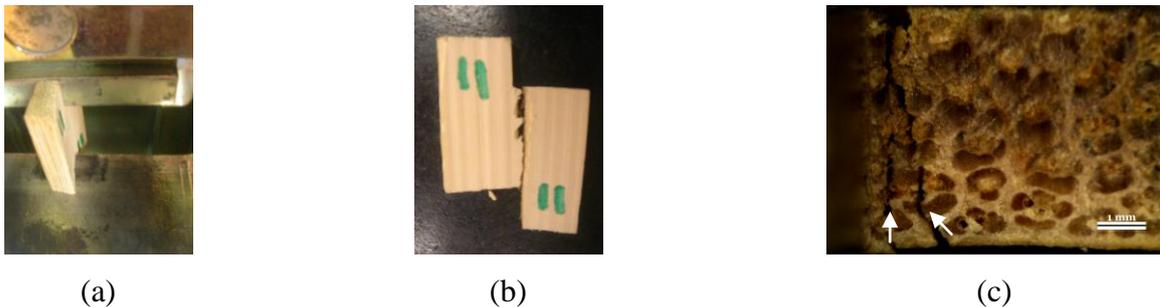


Figura 82 – Corpo de prova no instante do ensaio (a), após a ruptura (b) e a linha de ruptura no plano transversal (c)

O corpo de prova que menos resistiu ao esforço de cisalhamento foi o da repetição 10 (10,40 MPa). Vê-se, na Figura 83 (a), o corpo de prova no momento do ensaio e, nas Figuras 83 (b) e (c) do plano transversal, notou-se fissuras na superfície do material que provavelmente contribuíram para a perda de resistência do referido corpo de prova.

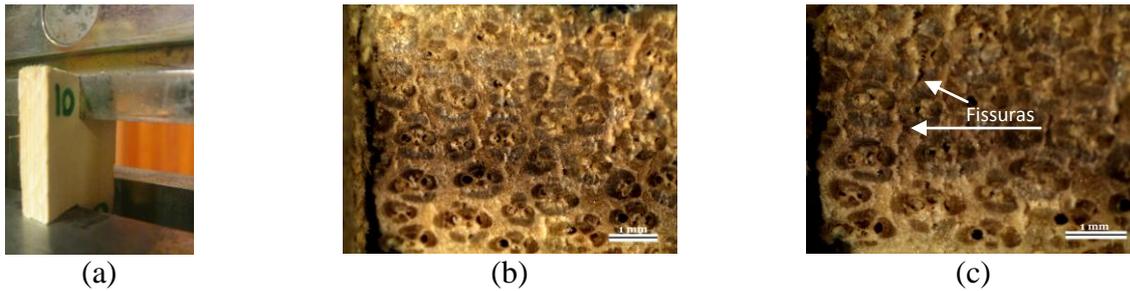


Figura 83 – Corpo de prova internodal camada interna da repetição 10 sendo testado (a), ruptura no plano transversal (b) e fissuras do tecido anatômico (c)

As médias de resistência ao cisalhamento radial das camadas internas e externas das ripas na condição nodal foram estatisticamente iguais. Dentro das repetições nodais das camadas externas das ripas, destacou-se a repetição 8, a qual apresentou resistência de 18,31MPa. Na Figura 84 (a) percebeu-se no plano tangencial em uma das extremidades do corpo de prova, que a ruptura não ocorreu no plano teoricamente projetado para o cisalhamento. Na Figura 84 (b) no plano transversal observou-se o acréscimo de área através da linha de ruptura apontado pela seta. A Figura 84 (c) refere-se ao plano tangencial da outra extremidade do corpo de prova, onde se notou que a linha de ruptura seguiu a grã iniciando no plano projetado para o cisalhamento e desviando-se para o plano de clivagem natural determinado pela grã do corpo de prova, como sinalizado pelas setas. Na Figura 84 (d), no plano transversal, percebeu-se que a linha de ruptura iniciou-se no plano determinado para cisalhar e que ocorreu no tecido parenquimático.

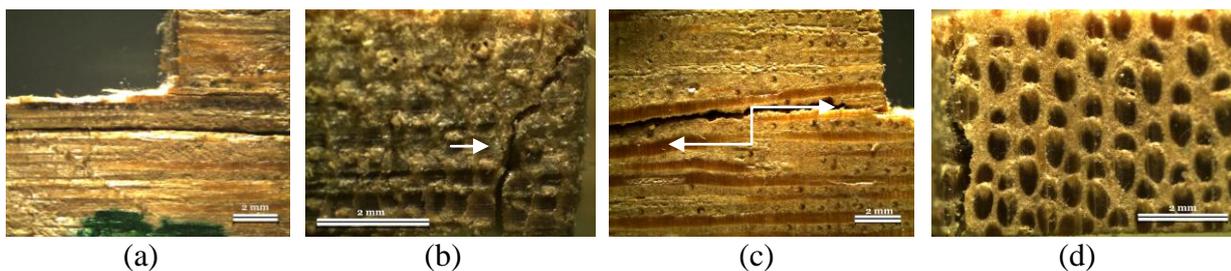


Figura 84 – Corpo de prova nodal no plano tangencial longitudinal (a), no plano transversal (b) e acréscimo de área de cisalhamento (c)

Dentro das repetições nodais da camada externa da ripa a 4 foi a que menos resistiu ao esforço exercido pela carga de cisalhamento (7,48 MPa), podendo-se notar no plano tangencial longitudinal da Figura 85 (a) a presença de duas linhas de ruptura percorrendo paralelamente os feixes de fibras e indicadas pelas setas. Na Figura 85 (b), observou-se no plano transversal do corpo de prova uma sequência de feixes de fibras coincidindo com a linha proposta para o cisalhamento e, bem próximo a eles, feixes de fibras orientados transversalmente. A ruptura

não ocorreu no plano projetado para o cisalhamento e migrou para outra área do corpo de prova (Figura 85 (c)). Na outra extremidade do corpo de prova a ruptura ocorreu no plano projetado para o cisalhamento (Figura 85 (d)). Notou-se que em ambas as linhas de rupturas das extremidades do corpo de prova ocorreram no tecido parenquimático tangenciando os feixes de fibras (Figura 85 (c), (d)).

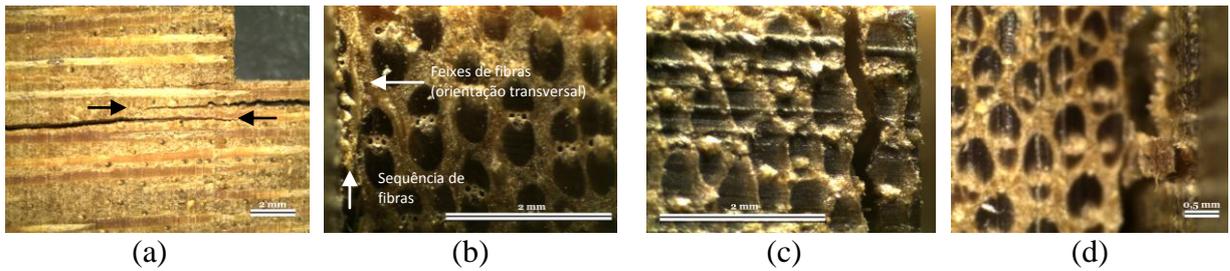


Figura 85 – Linhas de ruptura do corpo de prova nodal da camada externa no plano tangencial (a), no plano transversal área projetada para cisalhar intacta (b) e a ruptura ocorrida fora dela (c) de uma das extremidades do corpo de prova e da outra, a linha de ruptura ocorrida dentro da área projetada (d)

O corpo de prova nodal mais resistente da camada interna foi o da repetição 1 (13,38 MPa), notando-se, na Figura 86 (a), no plano tangencial, que a ruptura do corpo de prova contornou feixes de fibras através do tecido parenquimático. Na Figura 86 (b), em uma das extremidades do corpo de prova, a ruptura ocorreu na área projetada para cisalhar e praticamente no tecido parenquimático com exceção de dois feixes de fibras que não se romperam com o esforço mecânico, os quais estão apontados por setas na Figura. Na outra extremidade a linha de ruptura ocorreu exatamente no local projetado para o cisalhamento, como observado pela seta (Figura 86 (c)).

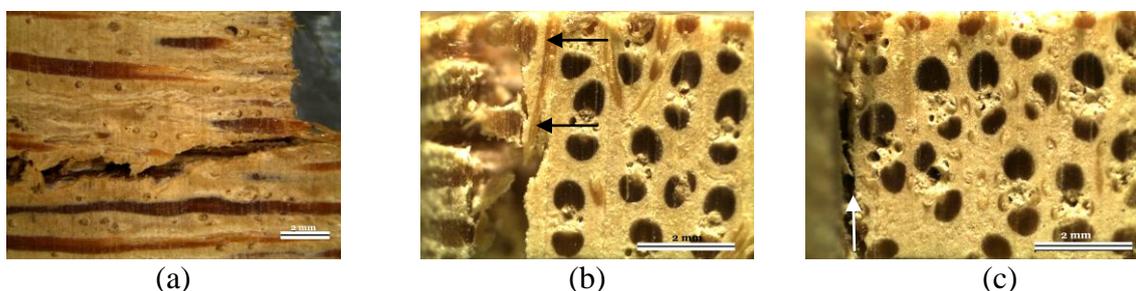


Figura 86 – Corpo de prova nodal da camada externa no plano tangencial longitudinal de uma das extremidades (a) e da outra (b) e área cisalhada no plano transversal (c)

O corpo de prova nodal da camada interna que apresentou menor resistência ao cisalhamento foi o da repetição 10 (7,84 MPa), mostrado segundo o seu plano tangencial longitudinal na Figura 87 (a), observando-se que a ruptura ocorreu no tecido parenquimático desviando-se

dos feixes de fibras. No plano transversal, observou-se a ruptura no tecido parenquimático contornando os feixes de fibras transversais e longitudinais, os quais são característicos no plano transversal das regiões nodais (Figura 87 (b) e (c)).

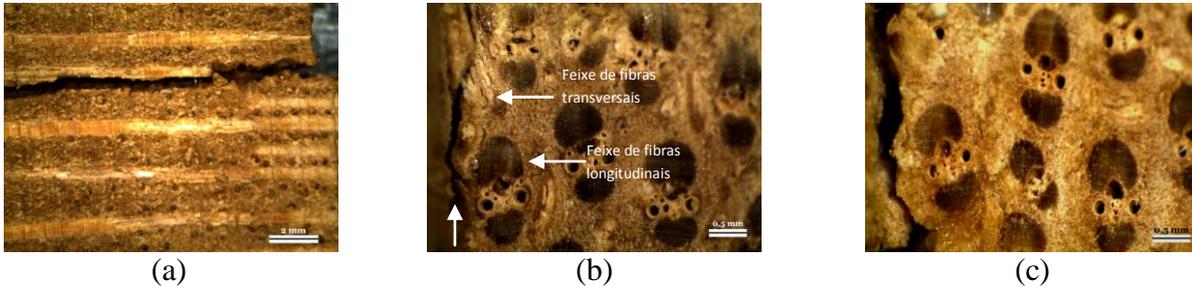


Figura 87 – Corpo de prova nodal da camada interna no plano tangencial longitudinal (a) linha de ruptura tangenciando feixes de fibras no plano transversal de uma das extremidades do corpo de prova (b) e da outra, passando pelo tecido parenquimático (b)

#### 4.1.2 Lâmina

A Figura 88 apresenta os dados de resistência ao cisalhamento radial para os corpos de prova que representam o material processado. O material processado aparenta maior uniformidade do que o material bruto devido ao processamento mecânico e observou-se que essa uniformidade do corpo de prova agregou maior resistência ao material processado em relação ao material bruto, especialmente ao nodal. Observou-se um acréscimo de resistência, sendo que para as lâminas internodais houve 6,33% de melhoria em relação às ripas, e para as nodais, agregou-se 19,82% de resistência ao cisalhamento à média das ripas.

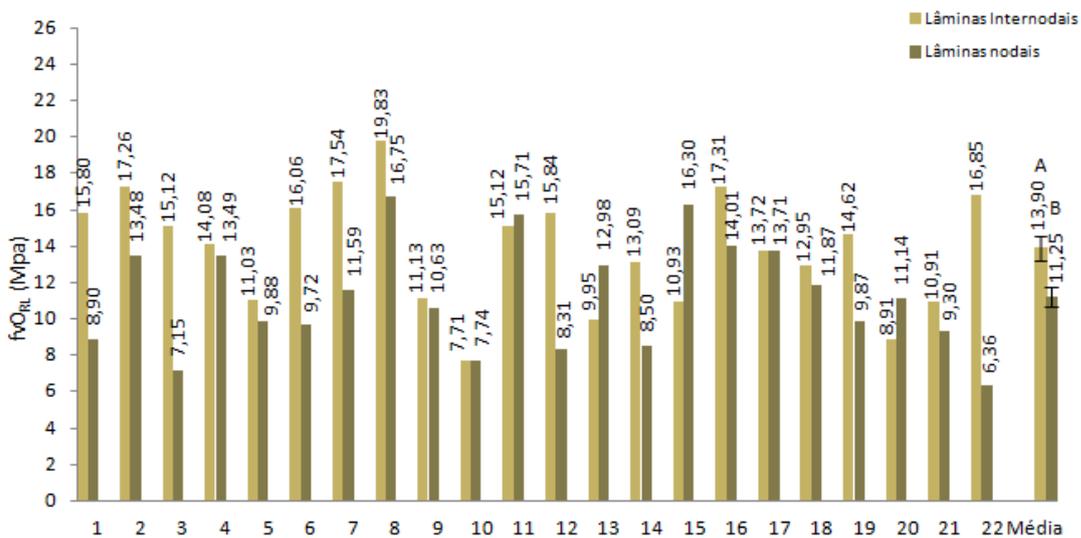


Figura 88 – Resistência ao cisalhamento radial nas repetições de lâminas ( $fv_{0_{RL}}$ )

Com o processamento do material a grã foi evidenciada e facilitou a compreensão de certos tipos de rupturas encontradas nos corpos de prova. A orientação da grã no corpo de prova tem relação direta com o mecanismo de ruptura, porque há a tendência de a ruptura seguir estritamente a grã encontrada no corpo de prova. Algumas fissuras também podem estar presentes no corpo de prova, e essas fissuras podem ser imperceptíveis a olho nu, ou não, e que podem ter sido provocadas por uma série de motivos, como por exemplo, secagem, pressão, processamento mecânico, acarretando diminuição na resistência ao cisalhamento radial. Na Figura 89, observam-se exemplos das orientações das grãs no material processado e as tendências de rupturas.

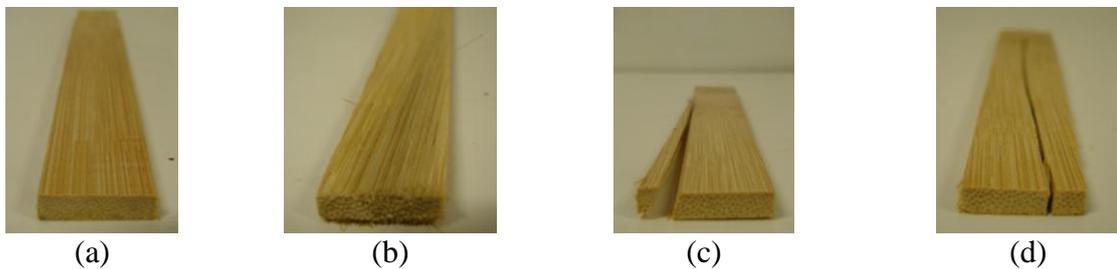


Figura 89 – Lâminas internodais com a orientação da grã alinhada (a) e desalinhada (b) com o eixo da peça e lâminas com fissura ocasional ao longo da grã da lâmina (c, d)

Para exemplificar a influência da grã nos tipos de ruptura encontrados nos corpos de prova foram selecionadas as repetições internodais 3 e 7, as quais apresentaram bom desempenho mecânico, 15,12 e 17,54 MPa, respectivamente. A ruptura da repetição 3 seguiu claramente a grã desviando da área de cisalhamento nominal do corpo de prova, como mostrado na Figura 90 (a) em vista lateral tangencial longitudinal. Nas Figuras 90 (b) e (c) observou-se em vista transversal que a ruptura não ocorreu na área pré determinada no corpo de prova a qual permaneceu intacta e que houve o acréscimo de área, como apontado pelas setas na Figura. Na Figura 90 (d), observou-se a área planejada para o cisalhamento do corpo de prova intacta, como indicada na Figura.

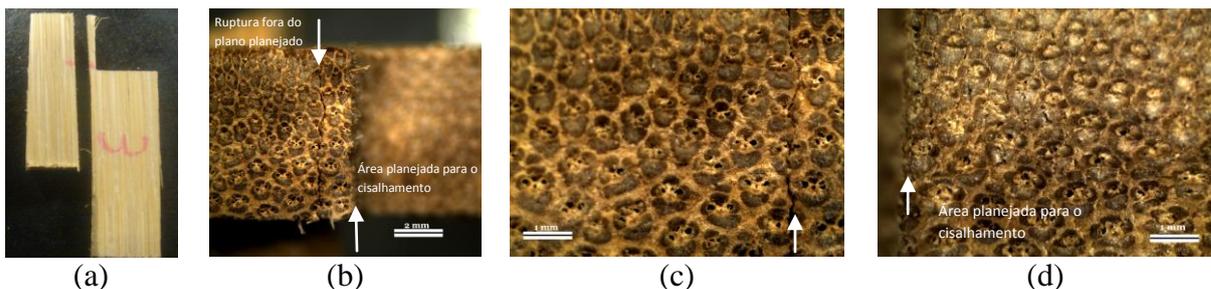


Figura 90 – Corpo de prova da repetição 3 (a) com a com a linha de ruptura ocorrida fora da posição planejada (b) e (c) e com a planejada intacta (d)

Um outro tipo de ruptura encontrado nos corpos de prova é representado pela Figura 91 (a). Notou-se que a ruptura seguiu estritamente a grã encontrada no corpo de prova da repetição 7, uma ruptura retilínea, que ocorreu praticamente sobre a linha planejada para cisalhar. no corpo de prova (Figura 91 (b)) cortando feixes de fibras, vasos e floema, como indicado pela seta na Figura 91 (c).

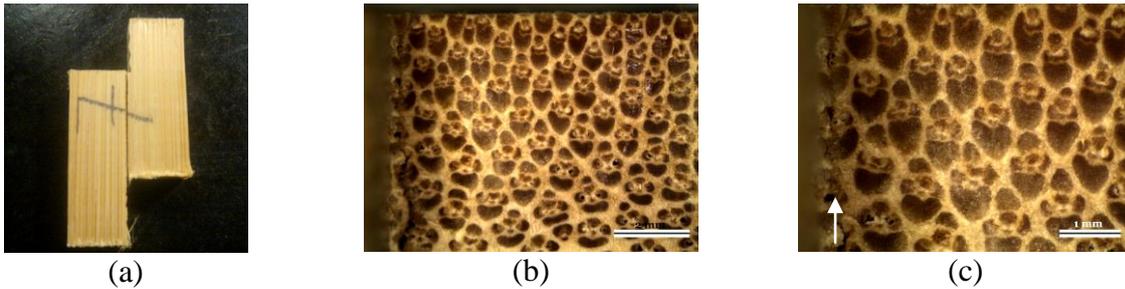


Figura 91 – Vista do plano tangencial longitudinal do corpo de prova internodal referente à repetição 7 (a), linha de ruptura (b) e detalhe de fibras cortadas (c) em vista transversal

Uma das resistências mais baixas (7,74 MPa) ocorreu na repetição 10 mostrada na Figura 92 (a). Notou-se que a ruptura seguiu estritamente a grã. A Figura 92 (b) refere-se à uma imagem geral no plano transversal do corpo de prova onde houve a ruptura não retilínea e, na Figura 92 (c), observou-se que a ruptura ocorreu em alguns pontos onde estavam localizados os feixes de fibras, como apontados na Figura, por setas.

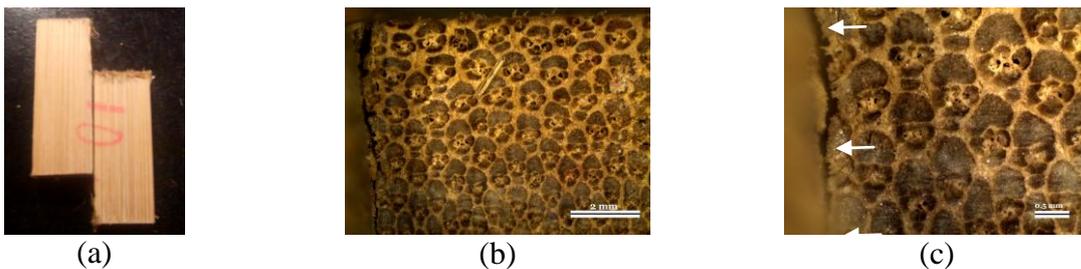


Figura 92 – Corpo de prova da repetição 10 (a), seção transversal do corpo de prova (b) linha de ruptura passando nos feixes de fibras (c)

O processamento mecânico para transformação das ripas em lâminas acarretou uma notável melhoria no material nodal. Notou-se nos corpos de prova que a ruptura do material internodal difere drasticamente da ruptura dos nós, que geralmente se apresentou como tortuosa devido ao irregular arranjo das células. A Figura 93 refere-se aos tipos de grã encontradas nas lâminas e os tipos de ruptura que ocorreram na região nodal das lâminas e dos corpos de prova. Na Figura 93 (a) observou-se que a grã de uma lâmina intacta seguiu de maneira linear antes da região nodal e que ao se aproximar desta região perdeu-se a

linearidade dando lugar à irregularidade dos elementos anatômicos, ocasionando a clivagem sinuosa, como visto na Figura 93 (b). Houve dois modos de clivagem nos corpos de prova do tipo nodal, sendo um dos tipos caracterizado pela ruptura fora da área teoricamente planejada para o cisalhamento por influência do desvio de grã (Figura 93 (c)) e o outro tipo sendo caracterizado por uma ruptura sinuosa na área planejada de cisalhamento (Figura 93 (d)).

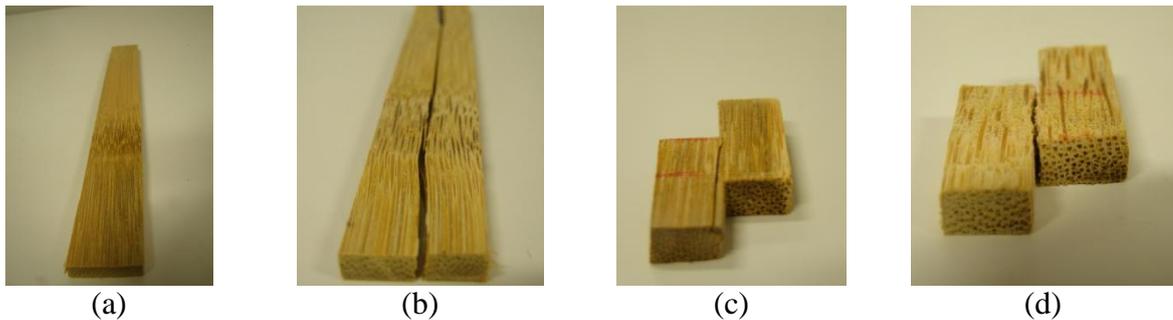


Figura 93 – Lâmina do tipo nodal intacta (a), ruptura sinuosa na região nodal da lâmina (b), desvio da grã da área de cisalhamento do corpo de prova nodal (c) e ruptura sinuosa na área de cisalhamento (d)

O exemplo típico de grã que se desvia da área proposta para o cisalhamento do corpo de prova pode ser observado no corpo de prova da repetição 15 (Figura 94 (a)). Essa repetição foi a que apresentou um dos melhores desempenho de resistência ao cisalhamento (16,3 MPa) no que se refere aos corpos de prova nodais. Notou-se no plano transversal que houve um pequeno acréscimo na área cisalhada, isso indica que a união das fibras dentro de alguns feixes no plano planejado para o cisalhamento, apresentavam-se tão resistente que não se fragmentaram ao meio, mas descolaram-se do tecido parenquimático, como indicado na Figura 94 (c). Na Figura 94 (b), observou-se que o desvio da ruptura desses feixes de fibras, ocasionou o acréscimo da área de cisalhamento.

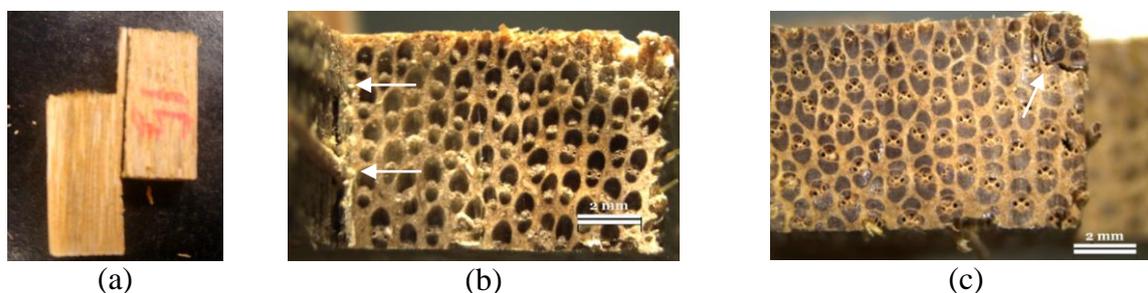


Figura 94 – Corpo de prova nodal repetição 15 (a), feixe de fibras intactos na área cortante do corpo de prova (b) e acréscimo da área de cisalhamento devido a ruptura fora do plano planejado para cisalhar (c)

O corpo de prova da repetição 22 (Figura 95 (a)) foi o que apresentou a menor resistência ao cisalhamento (6,36 MPa). Notou-se, no plano tangencial longitudinal, que a ruptura foi levemente sinuosa. No plano transversal, nas Figuras 95 (b) e (c), observou-se que a linha de ruptura ocorreu contornando os feixes de fibras e um deles, em especial, parece ter descolado do tecido que o circunda, ou seja, do tecido parenquimático, como indicado na Figura 95 (c).

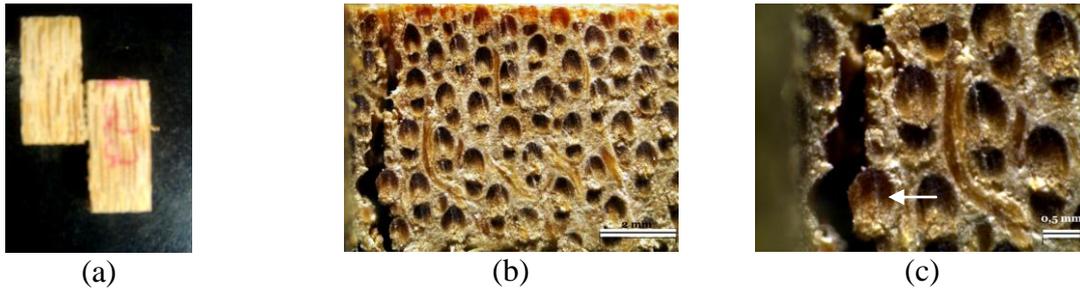


Figura 95 – Corpo de prova da repetição 22 (a), ruptura sinuosa no tecido parenquimático (b) e contrornando feixes de fibras (c)

No geral, o material processado internodal apresentou resistência ao cisalhamento radial ligeiramente superior ao da ripa (Figura 96). A parede do colmo apresenta variação de fibras na direção radial, sendo mais abundantes próximas à casca, ou seja, na camada mais externa e decrescendo em direção à camada interna, de maneira que ao processar o material bruto para transformação de lâminas foi estabelecido desgastar-se o mínimo da camada externa e o máximo da interna, resultando em lâminas com maior teor de fibras e mais uniformes em relação aos feixes de fibras, diferindo do corpo de prova da ripa que compreende toda a variação radial de distribuição das fibras ao longo da parede do colmo. A Figura 96 mostra a comparação entre médias de ripas e lâminas internodais e nodais.

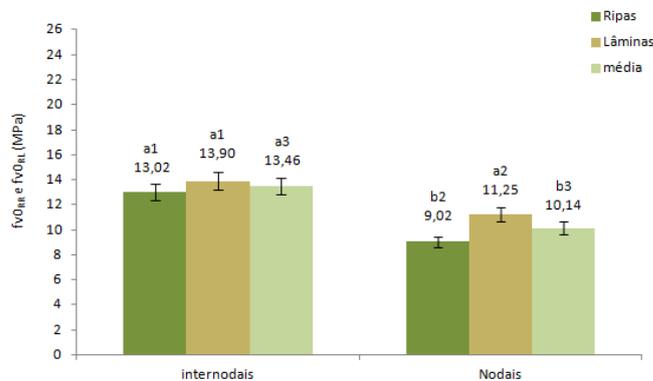


Figura 96 – Resistência ao cisalhamento radial da ripa ( $fv0_{RR}$ ) e da lâmina ( $fv0_{RL}$ ) do material lenhoso do bambu

Os corpos de prova internodais mostraram-se mais resistentes do que os nodais (grupo de médias de índice 3), embora tenham ocorrido exceções em corpos de prova na amostra. A

diferença de resistência entre os materiais é decorrente da distribuição mais homogênea dos elementos anatômicos encontrados nas regiões internodais do colmo, que contribui para elevar a resistência. No material internodal processado não houve diferença significativa entre ripa e lâmina (grupo de médias de índice 1), mas no material nodal a lâmina apresentou resistência superior à da ripa (grupo de médias de índice 2). Embora o material bruto nodal tenha apresentado menor resistência em relação ao processado nodal, acredita-se que este resultado esteja relacionado ao processamento mecânico do colmo para produção dos corpos de prova bruto, pois foi necessário um desgaste da protuberância do nó e também do diafragma da ripa para permitir a medição dos lados da área de cisalhamento, podendo ter ocasionado um desfavorecimento do material bruto, pois ao efetuar-se esse procedimento muitos dos feixes vasculares concentrados na camada externa da ripa foram eliminados. A resistência foi medida em uma região da parede do colmo ligeiramente diferente daquela da lâmina embora tenha sido manufaturada de forma a conter o maior teor de fibras possível.

Numa análise geral, a ripa internodal (RI) é mais resistente ao cisalhamento radial do que a nodal (RN), como mostrado na Figura 97, comparando-se as médias de índice 1. As lâminas internodais (LI) foram significativamente mais resistentes do que as lâminas nodais (LN), (grupo de médias de índice 2). Para as camadas externas (RNE) e internas (RNI) dentro da qualidade do material nodal não houve diferença significativa, ou seja, a resistência ao cisalhamento é a mesma para as camadas externa (RIE) e interna (RII), como representado pelo grupo de médias de índice 3. Dentro da condição internodal as camadas externa e interna não apresentaram diferenças significativas entre si (grupo de médias seguidas do índice 4). A camada interna da ripa internodal comparada com a ripa interna na condição nodal apresentou diferença significativa, sendo a interna internodal mais resistente conforme mostram as médias seguidas do índice 5.

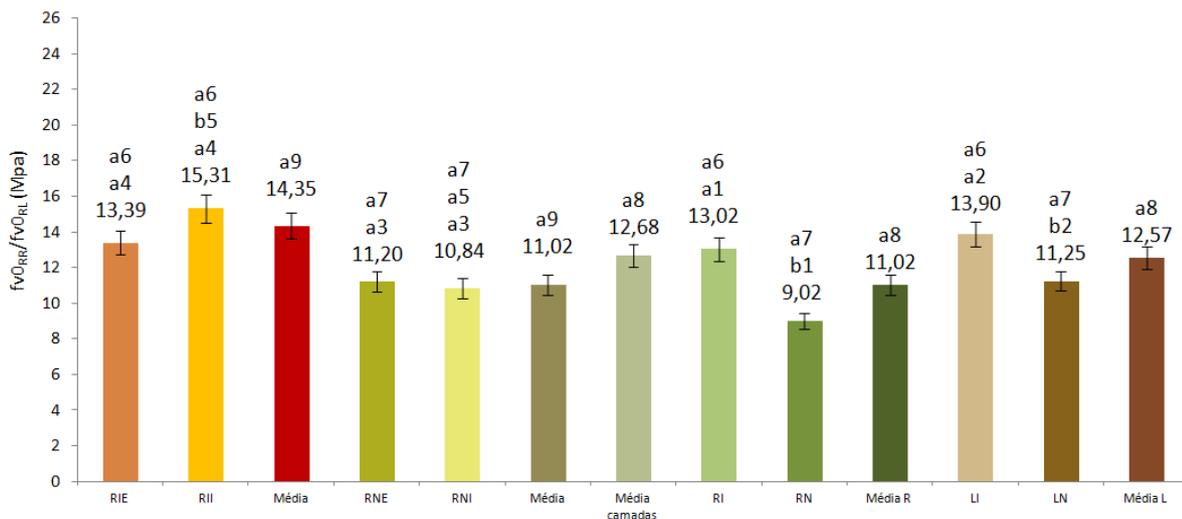


Figura 97 – Resistência ao cisalhamento radial da ripa ( $fv_{0RR}$ ) internodal (RI), nodal (RN) e em suas camadas externas/interiores internodal/nodal (RIE/RNE/RNE/RNI) e da lâmina ( $fv_{0RL}$ ) de bambu internodal (LI) e nodal (LN)

Dentro da condição internodal, a ripa bruta, as camadas externa e interna da ripa e a lâmina, foram estatisticamente iguais (grupo de médias seguidas do índice 6). Dentro da condição nodal, a ripa bruta, as camadas e a lâmina também não apresentaram diferenças significativas entre si (grupo de médias de índice 7). As médias que incluem as regiões internodal e nodal, da ripa bruta, das camadas externas e internas das ripas e da lâmina não apresentaram diferenças significativas, conforme as médias seguidas do índice 8. As médias internodais e nodais das camadas incluem camada interna e externa, foram comparadas e não apresentaram diferenças significativas entre si (grupo de médias de índice 9).

## 4.2 Cisalhamento tangencial longitudinal

### 4.2.1 Ripa

Nos resultados da presente pesquisa, o desalinhamento dos elementos anatômicos na região nodal pode ter favorecido a resistência ao cisalhamento tangencial longitudinal. Os dados de resistência ao cisalhamento tangencial longitudinal para cada repetição e a média da ripa bruta dentro da qualidade nodal e internodal, indicando diferença significativa, são observados na Figura 98. Para a condição internodal a resistência variou de 6,2 MPa a 15,2 MPa e, para nodal de 8,75 MPa a 22,52MPa.

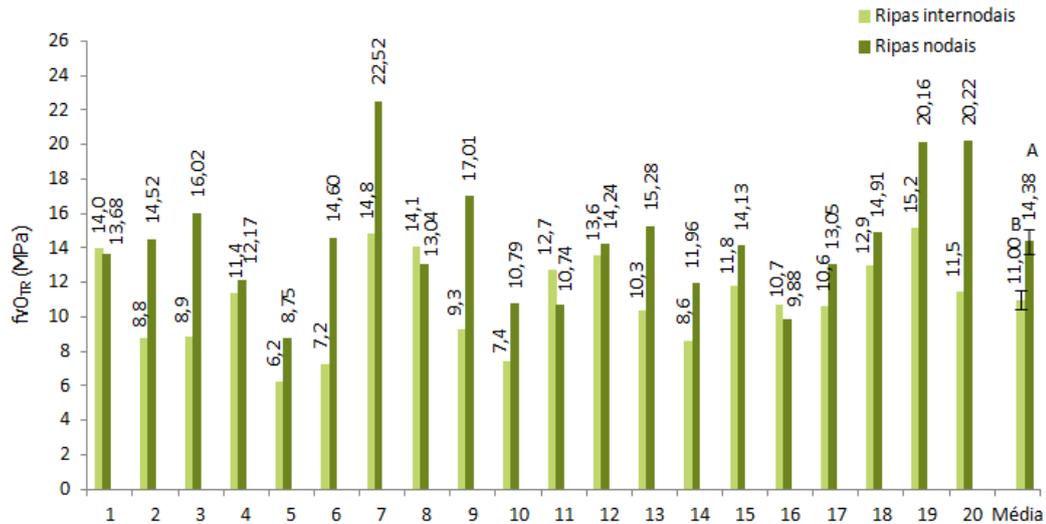


Figura 98 – Resistência ao cisalhamento tangencial ( $fv_{0TR}$ ) de ripas internodais e nodais

Para os corpos de prova internodais, houve basicamente dois tipos de ruptura, um com clivagem total na área projetada fragmentando o corpo de prova em duas partes e, o outro de clivagem parcial sem fragmentação do corpo de prova. O corpo de prova da repetição 19 que resistiu a 15,2 MPa é um exemplo do segundo tipo de ruptura. Observou-se que em uma das extremidades do corpo de prova, a linha de ruptura coincidiu exatamente com uma região de ocorrência sequencial de fibras (Figura 99 (a)). Provavelmente o referido corpo de prova teve a resistência ao cisalhamento tangencial favorecida, pois a maioria dos feixes de fibras se rompeu com exceção daqueles que foram os responsáveis por não fragmentar totalmente o corpo de prova. As setas nas Figuras 99 (b) e (c), apontam os feixes de fibras responsáveis pela não fragmentação do corpo de prova.

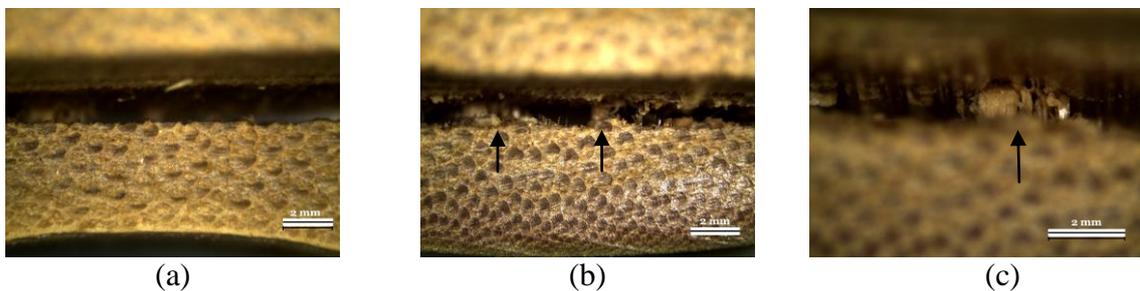


Figura 99 – Corpo de prova com sequencia de fibras na linha de ruptura em uma das suas extremidades (a), e na outra, feixe de fibras que não se romperam totalmente (b) e (c)

Outra repetição que também se evidenciou na condição internodal, foi a de número 7, pois o corpo de prova resistiu 14,8 MPa e sua clivagem foi similar à da repetição 19. A área

teoricamente proposta para o cisalhamento incidiu em uma área repleta de feixe de fibras, alguns destes feixes não se romperam totalmente após o ensaio de cisalhamento, não permitindo clivagem total do corpo de prova. Observa-se na Figura 100 (a) o corpo de prova sendo ensaiado. Notou-se na Figura 100 (b) que em uma das extremidades do corpo de prova, na seção transversal, a linha de ruptura ocorreu em área fibrosa e que alguns dos feixes de fibras não se romperam com a carga aplicada, o mesmo aconteceu na outra extremidade do corpo de prova (Figura 100 (c)).

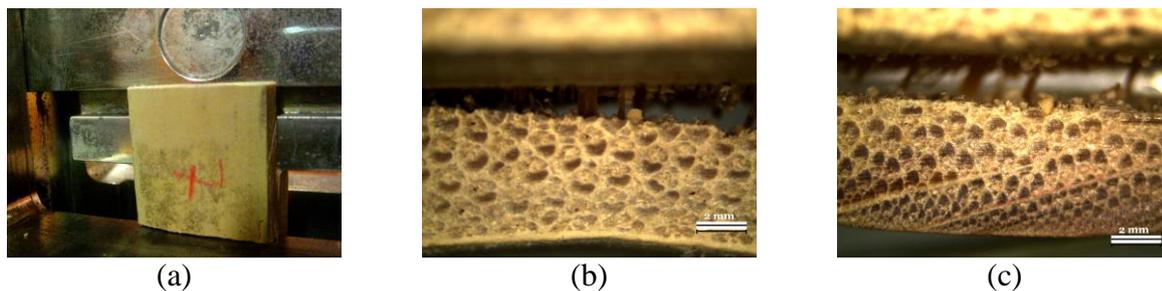


Figura 100 – Corpo de prova da repetição 07 sendo testado (a), plano transversal em uma de suas extremidades com a linha de ruptura ocorrida na sequencia de feixes de fibras (b) e vista dos feixes de fibras que foram responsáveis pela ruptura parcial do corpo de prova (c)

A repetição 5 foi aquela que apresentou menor resistência ao cisalhamento tangencial, embora a clivagem do corpo de prova tenha sido do tipo parcial, o desempenho não foi satisfatório, pois a resistência ao cisalhamento tangencial atingiu o valor de 6,2 MPa. Ao observar-se a ruptura do corpo de prova no microscópio estereoscópico, notou-se que o tecido do colmo estava repleto de fissuras, e provavelmente ocasionou a baixa resistência da repetição. A Figura 101 refere-se à ruptura do corpo de prova da repetição 5.

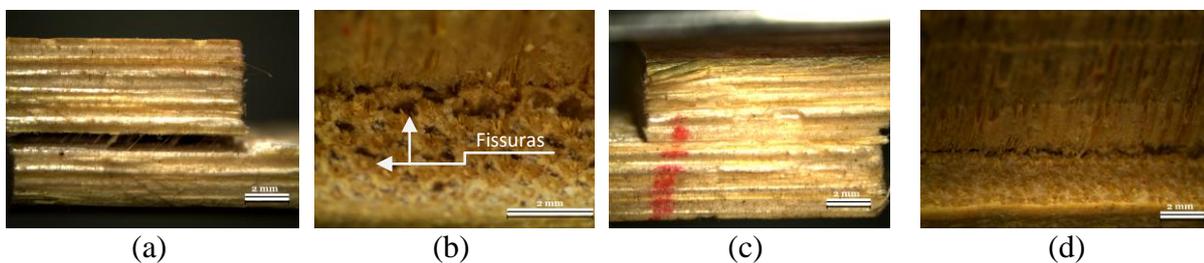


Figura 101 – Corpo de prova da repetição 5 com a linha de ruptura na direção longitudinal de um dos lados do corpo de prova (a), fissuras no plano transversal de uma das extremidades do corpo de prova (b), outro lado do corpo de prova sem ruptura longitudinal aparente (c), e linha de ruptura no plano transversal da outra extremidade do corpo de prova (d)

Dentro das 20 repetições nodais, somente 4 dos corpos de prova apresentaram clivagem total. Este resultado indica que o arranjo dos elementos anatômicos da região nodal contribuiu para aumentar a resistência ao cisalhamento tangencial às fibras. Na condição nodal, dentro do material bruto, o corpo de prova que mais resistiu aos esforços mecânicos, foi o da repetição 7 (Figura 102 (a)). Observou-se, na Figura 102 (b), no plano transversal que a linha de ruptura ocorreu no tecido parenquimático. A clivagem desse corpo de prova foi parcial devido a alguns feixes de fibras, entre eles, um é indicado por setas no plano longitudinal da Figura 102 (c), trata-se do feixe conectado em um dos lados do corpo de prova e, desconectado do tecido parenquimático do outro lado. No plano transversal na outra extremidade do corpo de prova, observou-se feixes de fibras intactos na linha de ruptura, como sinalizado pelas setas na Figura 102 (d).

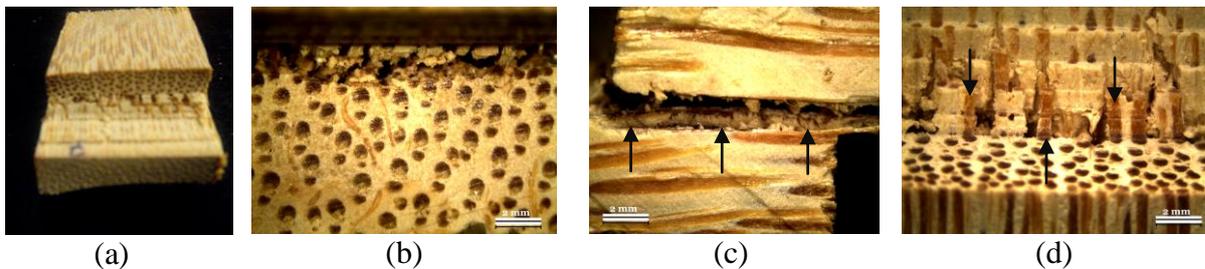


Figura 102 – Corpo de prova da ripa após o teste mecânico (a), linha de ruptura no plano transversal de uma das extremidades do corpo de prova (b)/(d) e, no plano longitudinal (c)

A repetição nodal de menor desempenho foi a de número 5, o corpo de prova resistiu 8,75 MPa e teve clivagem total, como visto na Figura 103 (a). O tecido anatômico aparentou-se poroso no plano de ruptura, conforme vê-se na Figura 103 (b), e no plano transversal notou-se que a ruptura ocorreu de forma sinuosa e predominantemente no tecido parenquimático (Figura 103 (c)).

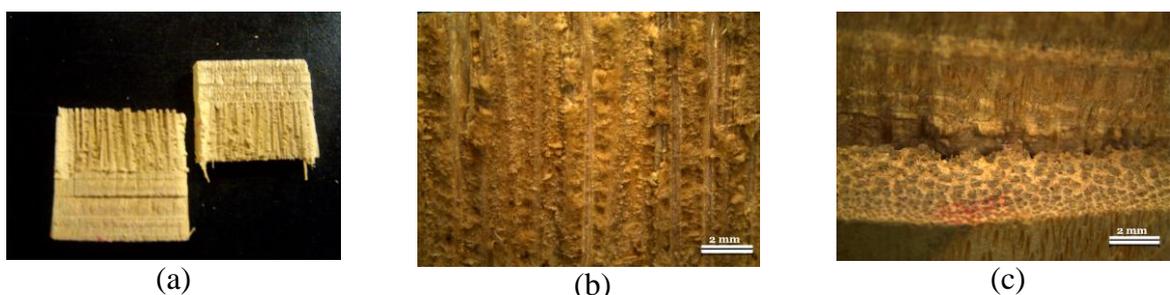


Figura 103 – Corpo de prova da repetição 5 com clivagem total (a) e plano de ruptura na direção tangencial longitudinal (b), no plano transversal a linha de ruptura passando pelo tecido parenquimático e contornando os feixes de fibras

#### 4.2.2 Lâmina

A transformação da ripa em lâmina acarretou melhoria em relação à resistência ao cisalhamento tangencial. O arranjo dos elementos anatômicos na região do nó favoreceu a resistência ao cisalhamento tangencial longitudinal da lâmina nodal. A média de resistência da lâmina nodal foi ligeiramente superior à média de resistência da lâmina internodal, mas o resultado não foi significativamente diferente, como observado na Figura 104. Os dados de resistência ao cisalhamento tangencial das lâminas internodais variaram de 9,66 MPa a 17,32 MPa, e das nodais de 7,75 MPa a 19,75 MPa.

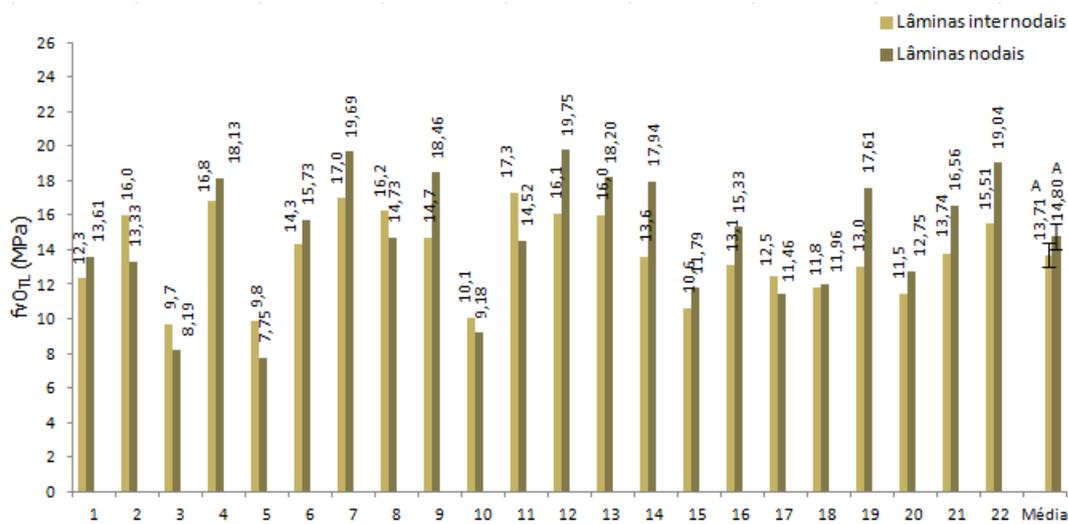


Figura 104 – Resistência ao cisalhamento tangencial de lâminas ( $fv_{0_{TL}}$ ) internodais e nodais

A maioria dos corpos de prova internodais apresentou clivagem total, com exceção dos que apresentaram esmagamento da área de cisalhamento. Dentre as repetições internodais, a repetição 11 apresentou a maior resistência ao cisalhamento tangencial (17,3 MPa). Na Figura 105 (a), observa-se o corpo de prova da repetição em questão sendo testado. No plano transversal de uma das extremidades do corpo de prova, notou-se que a linha de ruptura ocorreu de forma não retilínea (Figura 105 (b)) e, em alguns trechos, houve esmagamento dos feixes de fibras (Figura 105 (c)). No plano transversal da outra extremidade do corpo de prova, a linha de ruptura ocorreu fora da área projetada para o cisalhamento e percorreu pelo tecido de fácil rompimento, ou seja, o tecido parenquimático (Figura 105 (d)).

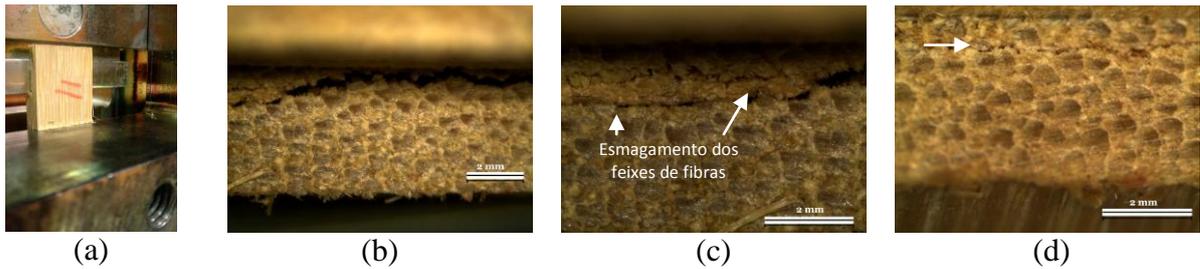


Figura 105 – Corpo de prova da repetição 11 durante o carregamento no ensaio de resistência ao cisalhamento tangencial (a), linha de ruptura no plano transversal de uma das extremidades do corpo de prova (b-c) e da outra extremidade (d)

A repetição 3 (internodal) foi a de menor resistência ao cisalhamento tangencial (9,7 MPa), e no plano transversal do corpo de prova notou-se que o tecido anatômico apresentou-se poroso e com fissuras, o que provavelmente teria causado o baixo desempenho da repetição e a clivagem total do corpo de prova (Figura 106 (a)). A linha da ruptura ocorreu praticamente na área planejada para cisalhar (Figura 106 (b)); a linha de ruptura do corpo de prova no plano longitudinal pode ser observada na Figura 106 (c).

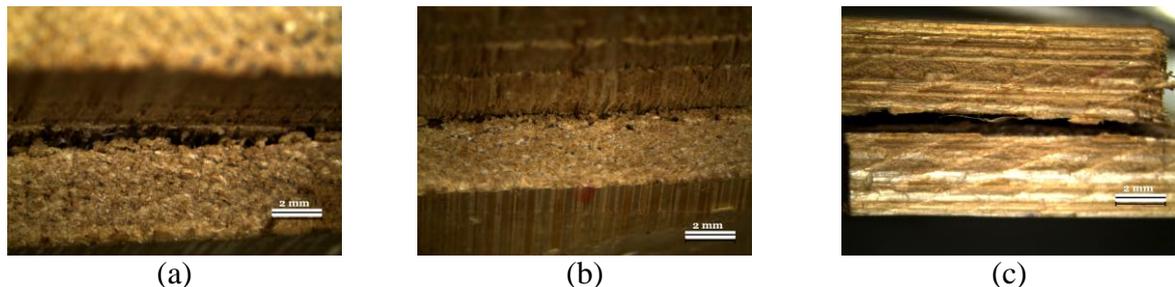


Figura 106 – Ruptura vista no plano transversal do corpo de prova onde foi aplicada a carga (a-b) e no plano longitudinal (c)

O único corpo de prova da lâmina internodal que apresentou sinal de esmagamento foi o da repetição 10, o qual resistiu 10,01 MPa. Na Figura 107 (a) percebeu-se sinais de esmagamento no corpo de prova da repetição mencionada no momento do carregamento da carga no ensaio de resistência ao cisalhamento. Notou-se no plano tangencial do corpo de prova, o esmagamento exatamente no plano planejado para cisalhar (Figura 107 (b)). Nos planos transversal (Figura 107 (c)) e tangencial longitudinal (Figura 107 (d)) do corpo de prova, notou-se o esmagamento ocasionado pelo carregamento da carga.

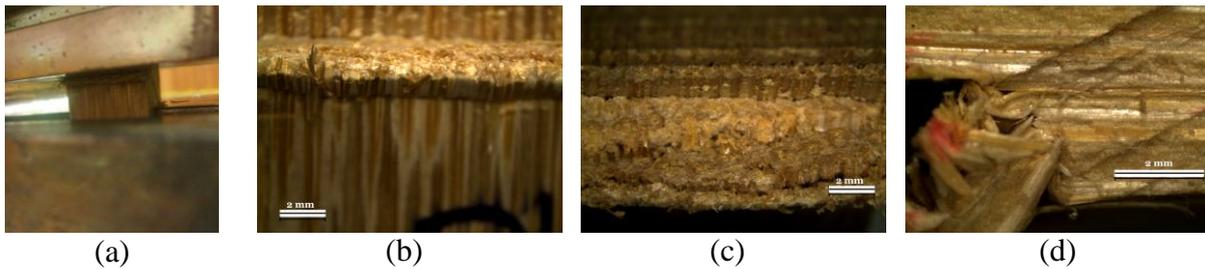


Figura 107 – Corpo de prova da repetição 10 durante o ensaio de cisalhamento (a), esmagamento do corpo de prova visto no plano tangencial (b), no plano transversal (c) e no plano longitudinal (d)

No geral os corpos de prova nodais não apresentaram clivagem total, no entanto três das vinte repetições apresentaram esmagamento das fibras na seção transversal onde foi aplicada a carga. Um dos exemplos de clivagem total do corpo de prova nodal foi aquela observada no corpo de prova da repetição 12, sendo esta a que apresentou o melhor desempenho de resistência ao cisalhamento tangencial (19,75 MPa). A área cisalhada do corpo de prova no plano tangencial longitudinal é mostrada na Figura 108 (a). No plano transversal de uma das extremidades do corpo de prova, observou-se que a linha de ruptura desviou dos feixes de fibras para o tecido parenquimático (Figura 108 (b)). Na outra extremidade a linha de ruptura ocorreu praticamente no local proposto para cisalhar (Figura 108 (c)).

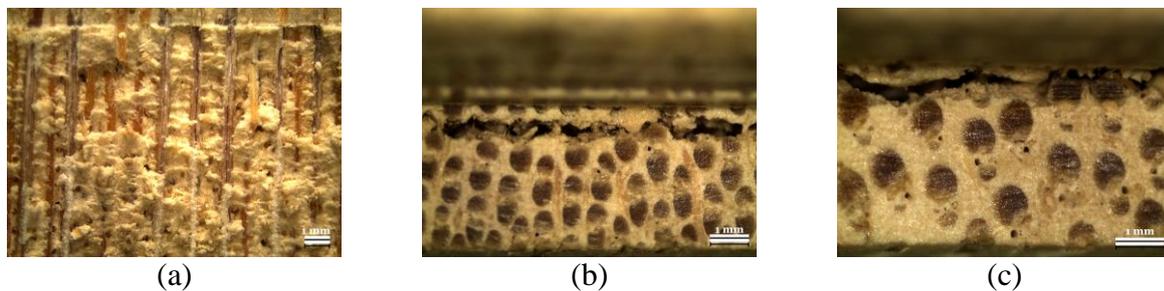


Figura 108 – Área cisalhada do corpo de prova da repetição 12 (a), linha de ruptura no tecido parenquimático no plano transversal de uma das extremidades do corpo de prova (b) e na outra extremidade a linha de ruptura ocorrida na região projetada para cisalhar (c)

Além da repetição 5 apresentar o menor desempenho mecânico (7,75 MPa) também apresentou esmagamento de fibras na área onde a carga foi aplicada. Na Figura 109 (a) é possível observar o esmagamento da área comprimida durante o ensaio mecânico. A área esmagada do corpo de prova é observada no plano transversal na Figura 109 (b) e no plano longitudinal na Figura 109 (c).

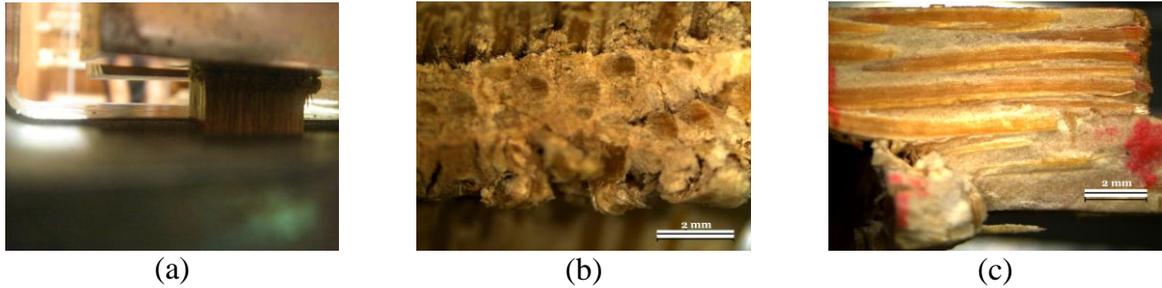


Figura 109 – Corpo de prova da repetição 5 durante o ensaio de cisalhamento tangencial longitudinal (a) e a área com sinais de esmagamento das fibras

A Figura 110 refere-se às médias de resistência ao cisalhamento tangencial de ripas e lâminas, nodais e internodais. Observou-se que não houve diferença significativa entre ripa e lâmina (grupo de médias de índice 1). Na condição internodal, as ripas e as lâminas são estatisticamente diferentes (grupo de médias de índice 2), sendo o material processado mais resistente. Dentro da condição nodal não houve diferença significativa entre ripas e lâminas (grupo de médias de índice 3). A ripa nodal diferiu significativamente da ripa internodal (grupo de médias de índice 4), e a lâmina nodal apresentou estatisticamente a mesma resistência que a lâmina internodal (grupo de médias de índice 5).

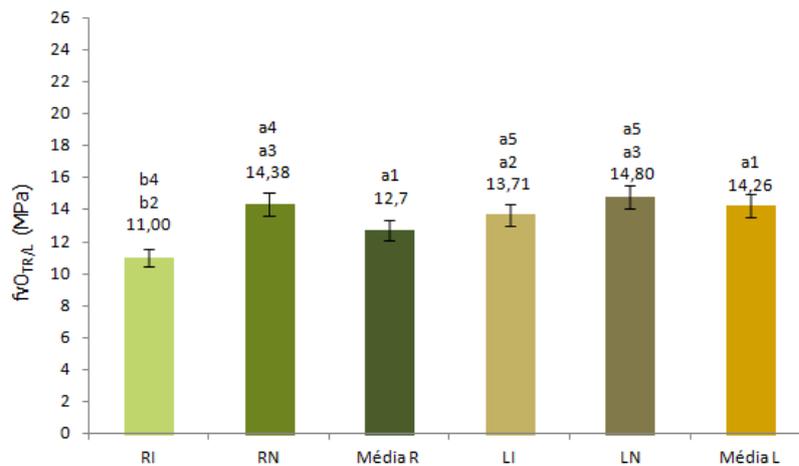


Figura 110 – Médias de resistência ao cisalhamento tangencial de ripas e lâminas dentro das condições internodal e nodal

### 4.2.3 Laminado colado com PVA

Quando comparado com a ripa bruta com a qual o laminado colado foi produzido, notou-se que a média de resistência ao cisalhamento da matéria prima (ripa bruta) usada para manufaturar o corpo de prova foi 4 vezes superior à do plano de cola. Na Figura 111, observam-se valores de resistências ao cisalhamento dos corpos de prova internodais colados de acordo com as pressões estudadas. A linha tracejada se refere à resistência média da lâmina

internodal maciça (13,70 MPa). Observou-se que 98% dos corpos de prova produzidos sob 1 MPa de pressão, apresentaram resistência ao cisalhamento inferior à dos corpos de prova produzidos com 2 e 3 MPa. Dos corpos de prova produzidos com 2 MPa de pressão, 38% se destacaram em relação às demais pressões estudadas. E para os corpos de prova produzidos sob pressão de 3 MPa, a resistência ao cisalhamento no plano de cola foi superior às demais pressões estudadas. A grande variabilidade entre repetições internodais suplantou o efeito do nó e da pressão aplicada na montagem dos corpos de prova colados com PVA.

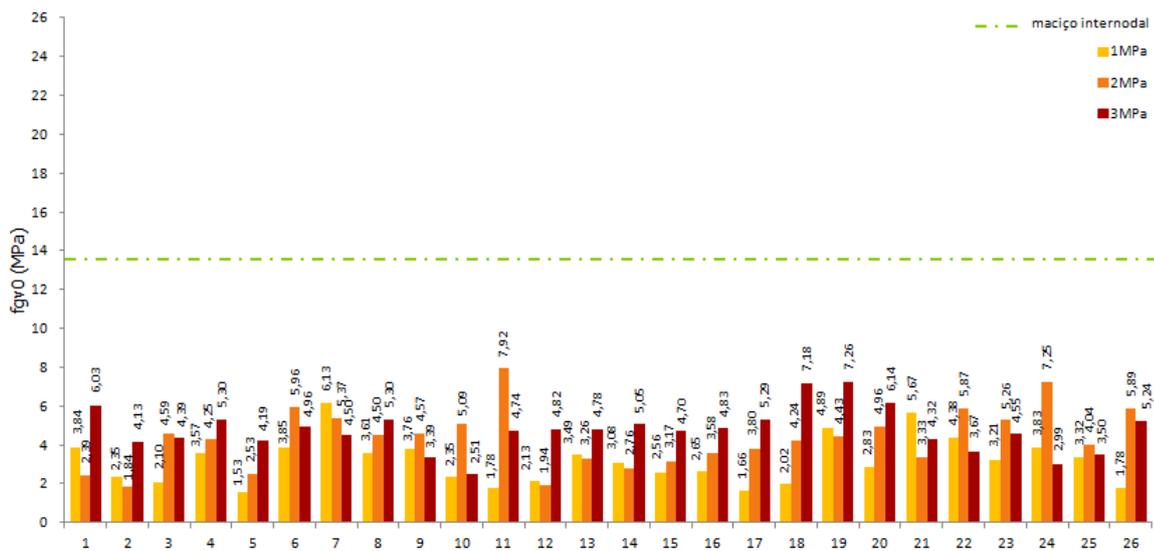


Figura 111– Resistência ao cisalhamento no plano de cola (fgv0) das repetições internodais

As rupturas dos corpos de prova internodais e nodais ocorreram de duas maneiras: uma por clivagem frágil, quando as lâminas que formavam o corpos de prova se desconectaram no plano de cola, e a outra plástica, quando as lâminas continuaram unidas mesmo após ocorrer a ruptura no ensaio mecânico (Figura 112).

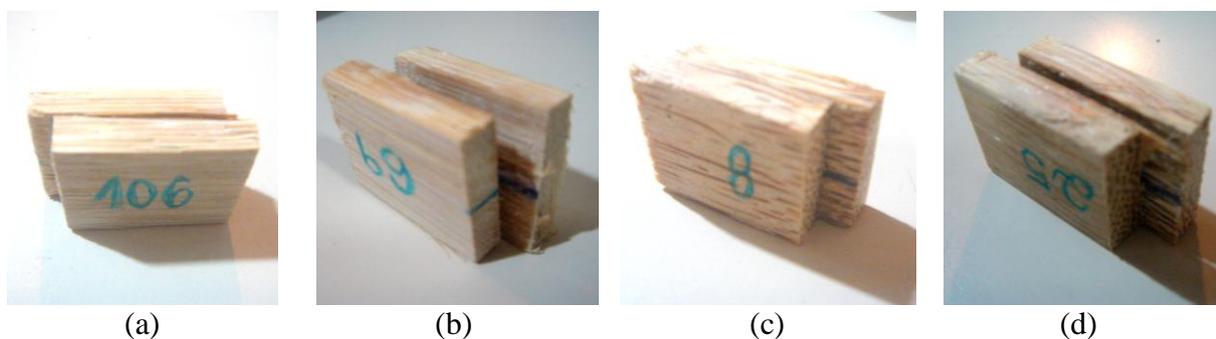


Figura 112 – Formas de ruptura ao cisalhamento dos corpos de prova internodais (a, b) e nodais (c, d)

Cerca de 42 % dos corpos de prova internodais, unidos com 1 MPa e 2 MPa de pressão, apresentaram clivagem frágil e, para os unidos com 3 MPa de pressão, essa porcentagem caiu para 34%, o que indica que quanto maior for a pressão aplicada no momento da colagem, a chance de ocorrer ruptura por clivagem frágil diminui, pois a resistência do plano de cola é maior. Para a condição nodal, a menor porcentagem de clivagem frágil (40%) ocorreu nos corpos de prova prensados com 1 MPa. Essa porcentagem dobrou para os corpos de prova prensados com 2 e 3 MPa de pressão. Na Figura 113, observou-se a variação dos dados de resistência ao cisalhamento no plano de cola das repetições. Nenhuma repetição apresentou resistência próxima à da lâmina nodal maciça representada pela linha tracejada (14,80 MPa).

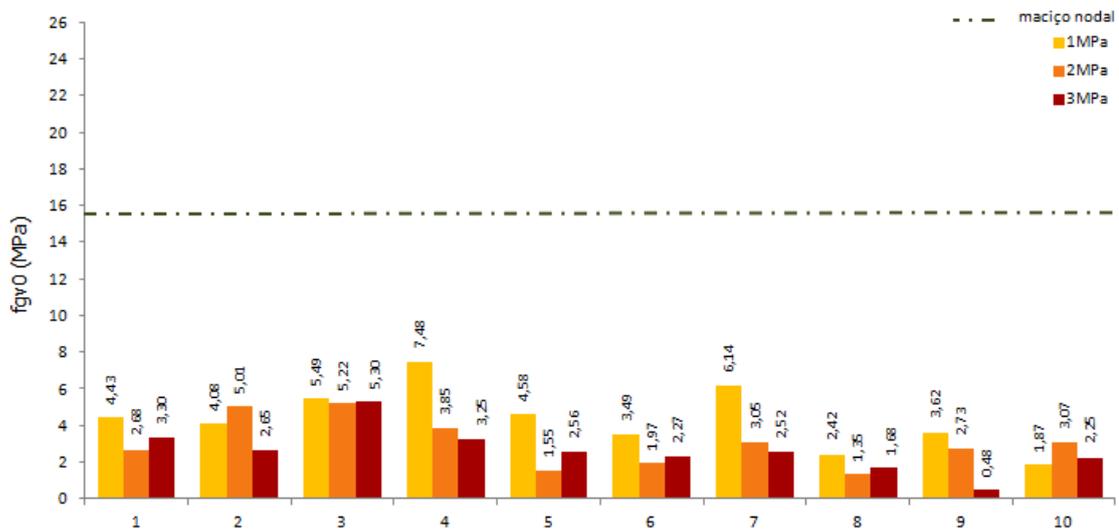


Figura 113 – Resistência ao cisalhamento na linha de cola (fgv0) das repetições nodais dentro das pressões estudadas

As médias de resistência ao cisalhamento tangencial longitudinal no plano de cola dos corpos de prova internodais e nodais dentro das três pressões estudadas podem ser observadas na Figura 114. As linhas pontilhadas nos valores de 10,50 e 15,56 MPa referem-se aos valores de resistência ao cisalhamento no plano de cola da espécie *D.giganteus* encontrados por Nogueira (2008). A linha tracejada no valor de 13,70 MPa representa a resistência da lâmina maciça internodal e a linha tracejado-pontilhada no valor de 14,80 MPa refere-se à resistência da lâmina nodal. Os valores de resistência ao cisalhamento do material maciço de bambu foram tomados da Figura 104.

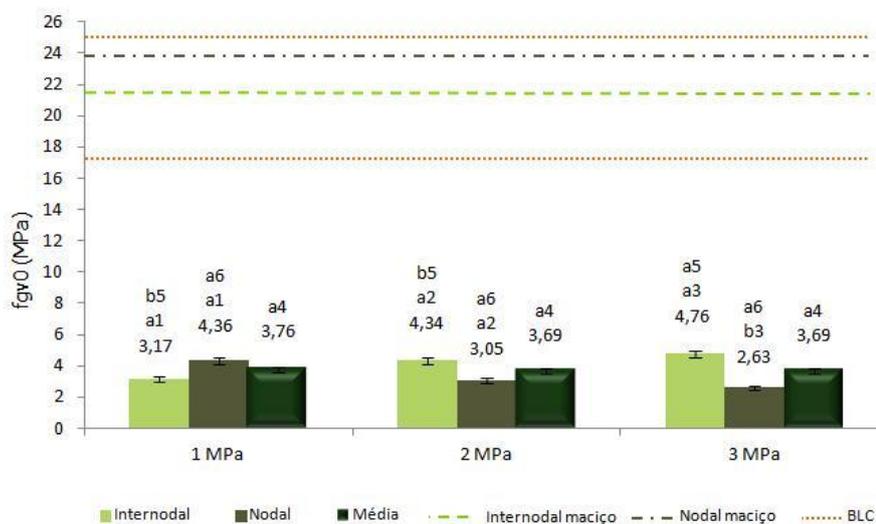


Figura 114 – Médias de resistência ao cisalhamento tangencial longitudinal no plano de cola ( $fgv_0$ ) dos corpos de prova internodais e nodais em função da pressão

A média de resistência ao cisalhamento dos corpos de prova internodais foi estatisticamente igual à dos corpos de prova nodais para a pressão de colagem de 1 MPa (grupo de médias de índice 1). Em relação à pressão de colagem de 2 MPa, a resistência ao cisalhamento no plano de cola não diferiu entre os corpos de prova internodais e nodais (grupo de médias de índice 2). Na pressão de colagem de 3 MPa, a média de resistência dos corpos de prova internodais foi significativamente superior à dos corpos de prova nodais (grupo de médias de índice 3). Na média geral, que inclui os dados de resistência dos corpos de prova internodais e nodais, não houve diferença significativa entre pressões (grupo de médias de índice 4). Em relação à condição internodal, as médias de resistência dos corpos de prova submetidos a 2 e 3 MPa de pressão de colagem foram estatisticamente as mesmas, mas diferiram da média de resistência dos corpos de prova submetidos a 1 MPa de pressão (grupo de médias de índice 5). Na condição nodal, as médias de resistência não apresentaram diferenças significativas entre as pressões estudadas (grupo de médias de índice 6).

#### 4.2.3.1 Análise sob Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

As micrografias revelaram que o arranjo anatômico das distintas regiões influenciou diretamente na adesão entre as lâminas que formam o corpo de prova e, conseqüentemente, na resistência ao cisalhamento. A Figura 115 refere-se às amostras retiradas dos corpos de prova submetidos a 1 MPa de pressão. Notou-se que os feixes de fibras da amostra internodal, vistos no plano transversal, são regulares (Figura 115 (a)) e orientados axialmente no plano

tangencial longitudinal (Figura 115 (b)). Na Figura 115 (c), em que se evidencia o plano transversal da amostra retirada da lâmina nodal, observou-se que os feixes de fibras aparecem desalinhados e alguns com 4 vasos do metaxilema e, no no plano tangencial longitudinal da amostra (Figura 115 (d)), os feixes de fibras não apareceram orientados axialmente, notando-se também a presença de vaso dentro de um feixe de fibra. Em nenhuma das micrografias das amostras submetidas a 1 MPa de pressão observou-se a presença de fissuras no tecido anatômico das lâminas, ou seja, a pressão aplicada não prejudicou o arranjo do tecido anatômico da amostra.

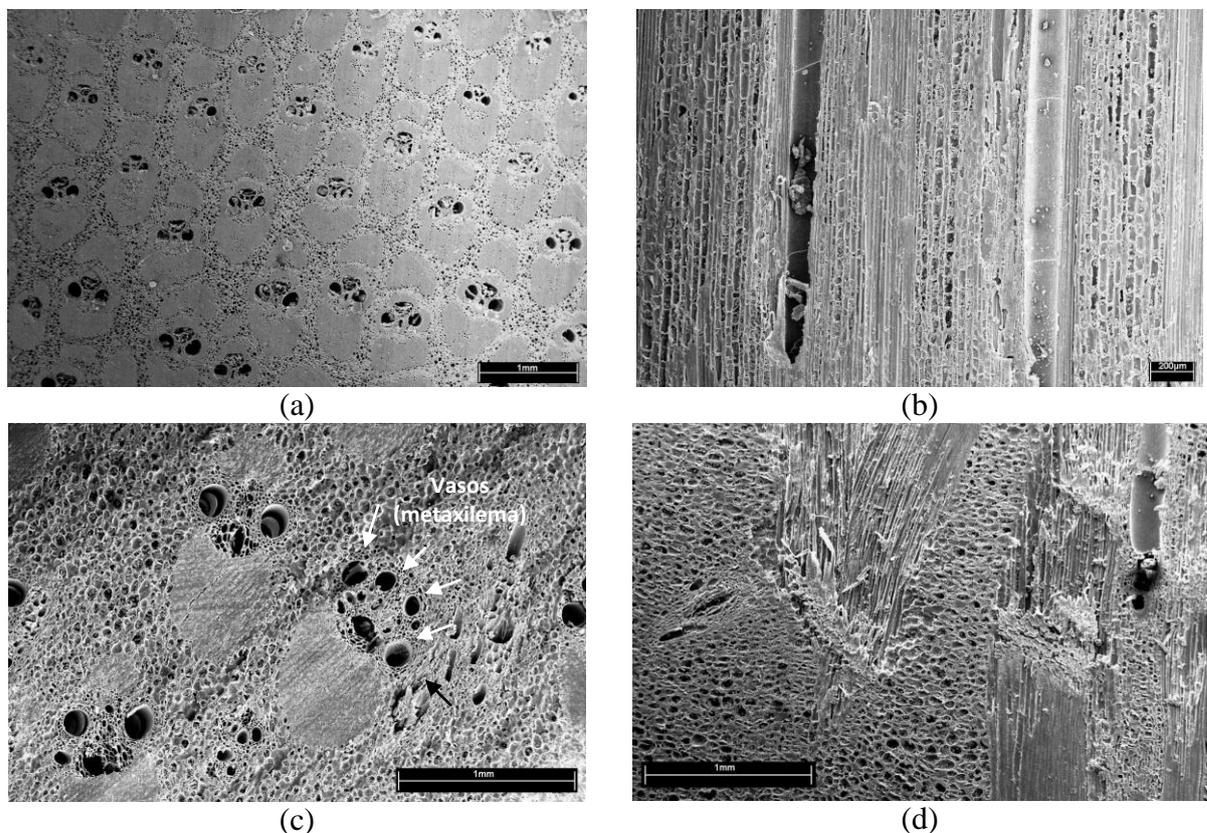


Figura 115 – Seção transversal internodal (a), tangencial internodal (b), transversal nodal (c) e tangencial nodal (d) obtidas de corpos de prova montados sob 1 MPa de pressão

As superfícies das amostras retiradas das lâminas internodal e nodal que foram submetidas a 2 MPa de pressão durante o processo de colagem são vistas no plano transversal e tangencial na Figura 116. Observou-se, na Figura 116 (a), similaridade com o tecido anatômico encontrado na amostra internodal da Figura 115 (a), em que os feixes de fibras se mostram orientados de forma uniforme e são regularmente formados pelo protoxilema, floema e os dois vasos do metaxilema. Na Figura 116 (b), os elementos anatômicos, como feixe de fibras, células do parênquima e vasos estão alinhados axialmente no plano tangencial longitudinal da lâmina.

Na Figura 116 (c), no plano transversal da amostra retirada da lâmina nodal, observou-se que os feixes de fibras orientados axialmente são alongados e que ocorreram feixes de fibras orientados transversalmente e, na Figura 116 (d), no plano tangencial longitudinal da amostra, os feixes de fibras transversais aparecem orientados de forma sinuosa. Notou-se que nenhum dano foi ocasionado ao tecido anatômico devido à pressão aplicada.

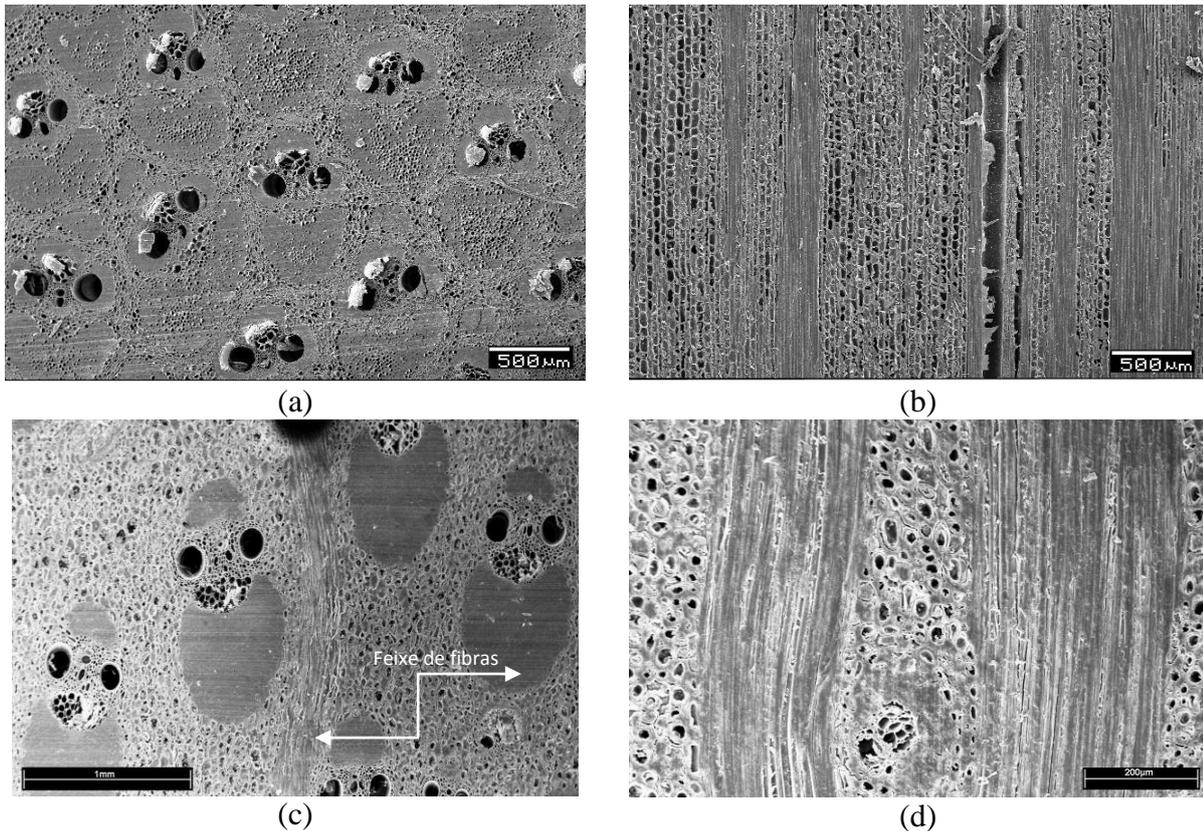


Figura 116 – Seção transversal internodal (a), tangencial internodal (b), transversal nodal (c) e tangencial nodal (d) obtidas de corpos de prova confeccionados com 2 MPa de pressão

A Figura 117 refere-se às amostras retiradas das lâminas internodal e nodal que foram submetidas a 3 MPa de pressão durante o processo de colagem dos corpos de prova. Notou-se, na Figura 117 (a), a presença de fissuras por quase todo o plano transversal da amostra, que pode ser um indício de dano no tecido anatômico provocado pela pressão, a qual pode ser considerada alta quando aplicada na direção normal. Não foi possível, entretanto, comprovar esse fato dado que fissuras similares podem aparecer por influência de tensões de secagem e/ou de tensões oriundas do impacto do fio de corte das ferramentas de acabamento ou mesmo da pressão dos roletes alimentadores aplicada na superfície da lâmina. No plano tangencial longitudinal da amostra não foram observadas as fissuras encontradas no plano transversal (Figura 117 (b)). No plano transversal da lâmina nodal percebeu-se a presença de feixe de

fibras alongados e células do parênquima com paredes espessas (Figura 117 (c)). No plano tangencial da lâmina (Figura 117 (d)) notou-se a presença de feixes de fibras orientados tanto longitudinalmente quanto transversalmente e ausência de fissuras aparentes no tecido.

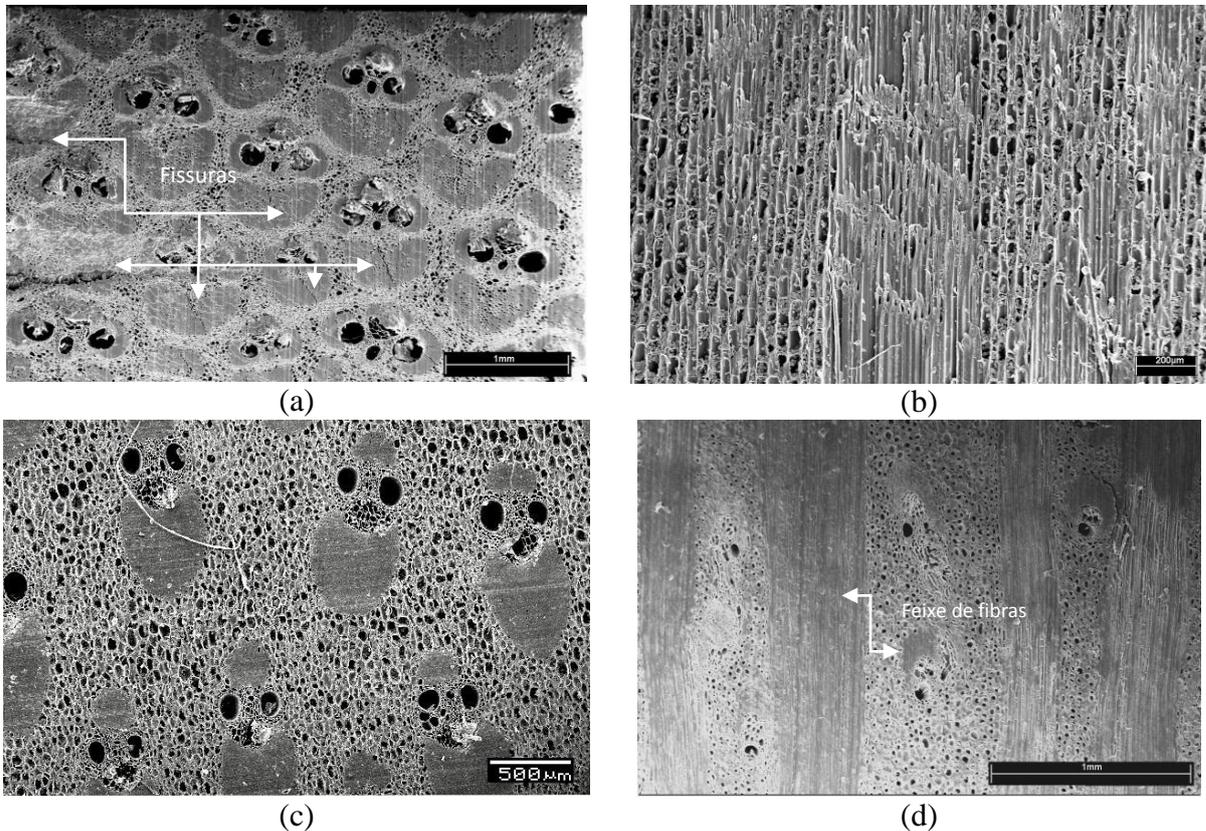


Figura 117 – Seção transversal internodal (a), tangencial internodal (b), transversal nodal (c) e tangencial nodal (d) obtidas de corpos de prova confeccionado com 3 MPa de pressão

#### 4.2.4 Na junta colada com RF

Os resultados obtidos no ensaio de resistência ao cisalhamento tangencial longitudinal no plano de cola para os corpos de prova preparados com o adesivo resorcinol-formaldeído (RF), superaram os resultados encontrados para os corpos de prova preparados com adesivo à base de PVA, mas foram inferiores em cerca de 50% aos do material maciço. A Figura 118 refere-se aos dados das três combinações de colagem para as três pressões estudadas.

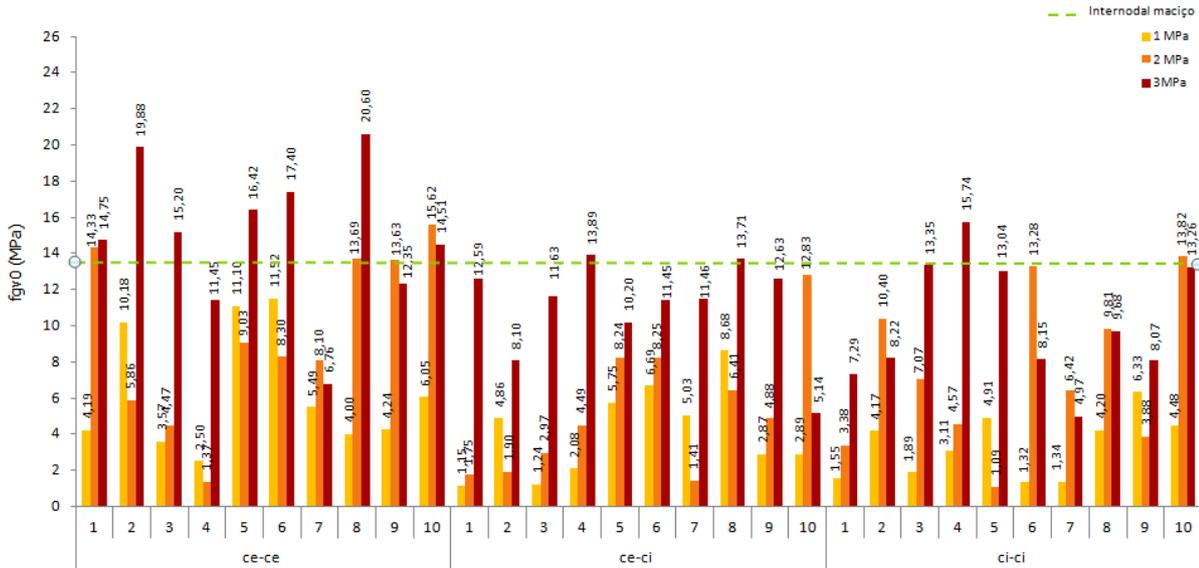


Figura 118 – Resistência ao cisalhamento no plano de cola (fgv0) dos corpos de prova preparados com o adesivo resorcinol-formaldeído aplicado às camadas externas (e) internas (i) e mistas, em função da pressão.

Notou-se que houve um acréscimo na resistência ao cisalhamento dos corpos de prova em relação ao aumento da pressão aplicada, independentemente da combinação de colagem. Os melhores resultados de resistência foram observados para os corpos de prova prensados sob 3 MPa de pressão. As médias de resistência ao cisalhamento para cada combinação de colagem em função das pressões de colagem estudadas são mostradas na Figura 119.

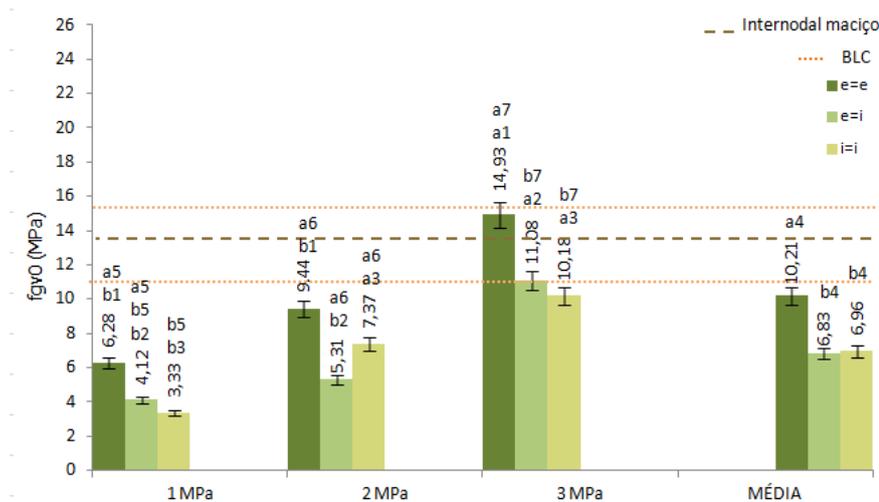


Figura 119 – Médias de resistência ao cisalhamento no plano de cola (fgv0) dos corpos de prova preparados com resorcinol-formaldeído sob diferentes pressões na colagem de camadas externas (e=e), internas (i=i) e mistas (e=i)

Observou-se que a combinação de camada externa com camada externa ( $e=e$ ) foi a de melhor desempenho dentro das três pressões. A resistência ao cisalhamento no plano de cola dos corpos de prova da combinação  $e=e$  submetidos a 3 MPa de pressão diferiu significativamente das demais pressões estudadas. Para os corpos de prova da combinação  $e=e$  submetidos à pressão de colagem de 1 e 2 MPa, a resistência não apresentou diferença significativa (grupo de médias de índice 1). Na combinação da camada externa com camada interna ( $e=i$ ) a resistência ao cisalhamento no plano de cola dos corpos de prova manufaturados com 3 MPa de pressão foi significativamente superior à resistência dos corpos de prova produzidos com 1 e 2 MPa. Para os corpos de prova da combinação  $e=i$  submetidos a 1 e 2 MPa de pressão a resistência foi estatisticamente a mesma (grupo de médias de índice 2). Dentro da combinação de colagem da camada interna com a camada interna ( $i=i$ ), a resistência da junta colada com RF foi estatisticamente igual para os corpos de prova produzidos com 2 e 3 MPa de pressão e, significativamente inferior para os manufaturados com 1 MPa de pressão (grupo de médias de índice 3). Com estes resultados fica evidente que a diferença anatômica das camadas interna e externa influencia a resistência ao cisalhamento da junta colada por apresentar condições distintas de ancoragem do adesivo. Na média geral das combinações de colagem, que inclui dados de resistência das 3 pressões estudadas, a combinação  $e=e$  foi significativamente superior às demais (grupo de médias de índice 4).

A anatomia da camada externa da parede do colmo é formada por células menores (parênquima e vasos) e feixes de fibras são mais próximos uns dos outros. Na camada interna as células do parênquima e os vasos são maiores e os feixes de fibras são mais espaçados uns dos outros. Os resultados indicaram que a combinação de colagem  $e=e$  foi mais eficiente para todas as pressões, o que significa que quando os elementos anatômicos das lâminas são menores e próximos um dos outros, há uma melhor ancoragem do adesivo e, conseqüentemente, ocorre melhor adesão entre lâminas por possibilitar uma distribuição quase contínua das tensões resistentes que surgem na interação cola-bambu.

A resistência ao cisalhamento no plano de cola dos corpos de prova produzidos com 1 MPa de pressão, foi significativamente inferior para a combinação  $i=i$  (grupo de médias de índice 5). Para os corpos de prova manufaturados com 2 MPa, a resistência foi estatisticamente igual para as 3 combinações de colagem (grupo de médias de índice 6). Para os corpos de prova colados com 3 MPa de pressão, a combinação  $e=e$  apresentou resistência significativamente superior às demais combinações (grupo de médias de índice 7).

#### 4.2.4.1 Análise sob a microscopia óptica

As imagens dos tecidos retirados da parede do colmo possibilitaram constatar as diferenças de distribuição dos elementos anatômicos dentro do colmo de bambu e verificar a interação do adesivo com os elementos anatômicos das lâminas usadas no preparo dos corpos de prova. Verificou-se que o adesivo penetra facilmente nas células parenquimáticas, floema e xilema e em alguns casos chega aos lumes das fibras, mas raramente penetra entre as próprias fibras, a não ser que o tecido anatômico apresente fissuras dentro dos feixes. Quanto à disposição dos feixes de fibras em relação aos feixes vasculares, comprovou-se que para a espécie *D.giganteus* o arranjo dos feixes de fibras se caracteriza pelos tipos IV como descoberto por Grosser e Liese (1974), pois os feixes vasculares do tecido estão situados entre dois feixes de fibras localizados próximos ao floema e protoxilema. Na camada mais externa da parede do colmo, as bainhas de esclerênquima que circundam o xilema, floema e protoxilema são densas e, em alguns casos, se unem aos feixes de fibras isolados que estão localizados nas extremidades dos feixes vasculares (metaxilema, floema e protoxilema circundados pelas bainhas de esclerênquima). Nessa região, os vasos são menores e mais numerosos e as células parenquimáticas que os circundam aparecem em menor quantidade (Figura 120 (a)) se comparadas com o tecido anatômico da camada interna onde apresentam-se em abundância envolvendo um menor número de feixes fibrovasculares, nos quais os dois vasos do xilema são amplos (Figura 120 (b)). Seja na camada externa ou interna, a distribuição transversal dos feixes fibrovasculares apresenta-se em harmonia na região internodal do colmo. Na seção transversal da região nodal a distribuição dos elementos anatômicos dentro da parede do colmo é irregular e ocorre tanto na seção transversal quanto longitudinal e não é raro encontrarem-se 4 ou mais vasos no metaxilema (Figura 120 (c)). Na Figura 120 (d), observou-se que, no plano tangencial longitudinal, as células longas do parênquima são intercaladas por células curtas ao longo do colmo e que o tecido parenquimático é bem disperso em face do tecido fibroso que é muito mais denso.

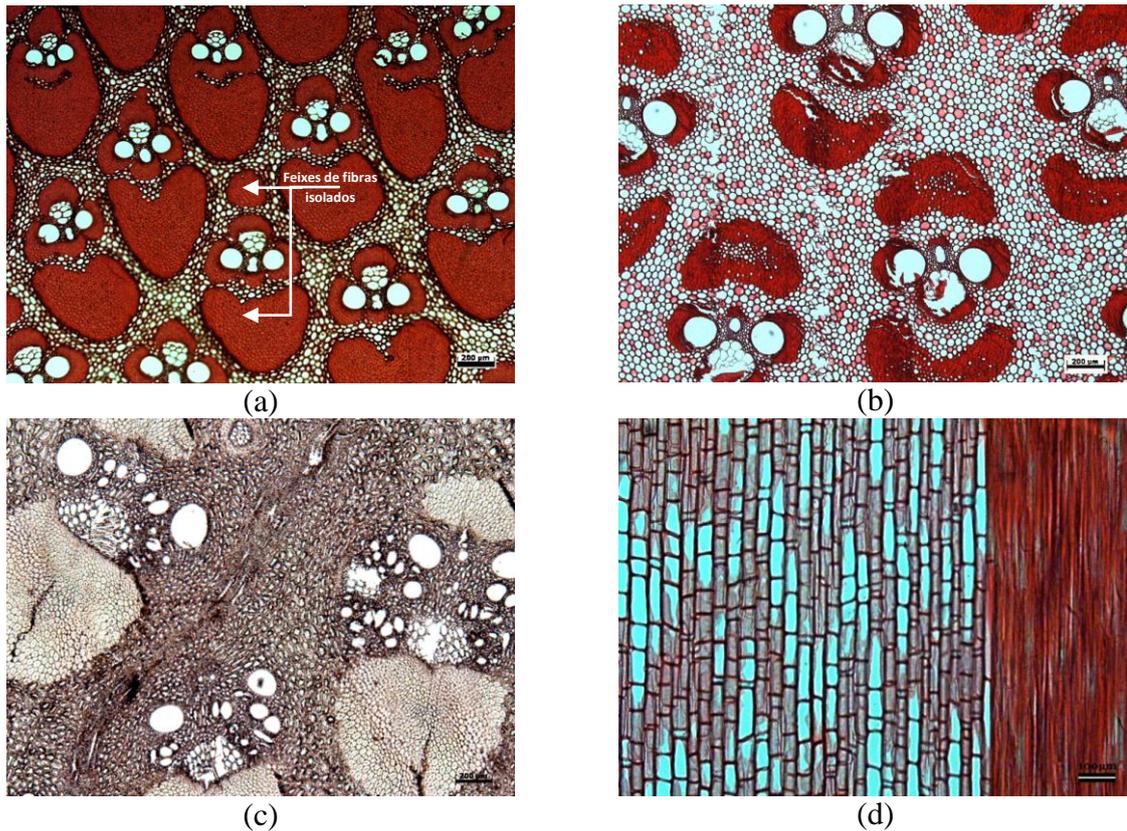


Figura 120 – Seção transversal dos tecidos anatômicos retirados da região internodal da camada externa (a) da parede do colmo da espécie *D. giganteus*, da interna (b), seção transversal do tecido anatômico da região nodal da parede do colmo (c) e seção transversal longitudinal (d) com detalhes diferenciados dos tecidos parenquimático e fibroso

No estudo da combinação de faces de colagem observou-se que o adesivo penetrou mais efetivamente em células do parênquima, nos vasos do xilema e no floema das lâminas, independentemente da combinação de colagem adotada. A resistência da ligação, em realidade depende do tecido anatômico com o qual o adesivo interage, pois se essa interação ocorrer na camada externa, a ligação sucederá no tecido de maior resistência e, por se tratar de células de menor diâmetro, o adesivo facilmente penetrará em uma grande área do tecido parenquimático e, muitas vezes contornará os feixes de fibras das lâminas fortalecendo a ligação entre elas (Figura 121 (a)). Se a interação do adesivo ocorrer no tecido da camada interna, a ligação será no tecido de menor resistência, pois o adesivo ocupará primeiramente os espaços das células com maiores diâmetro e, posteriormente, as de menores diâmetros, desta forma, o adesivo interage com tecidos anatômicos que não conferem grande resistência à ligação entre lâminas. A Figura 121 (b) evidencia a diferença de dispersão do adesivo numa ligação entre 2 lâminas dentro da combinação de colagem e=i em que o adesivo ocupou maior espaço nos elementos anatômicos da lâmina que continha a face interna.

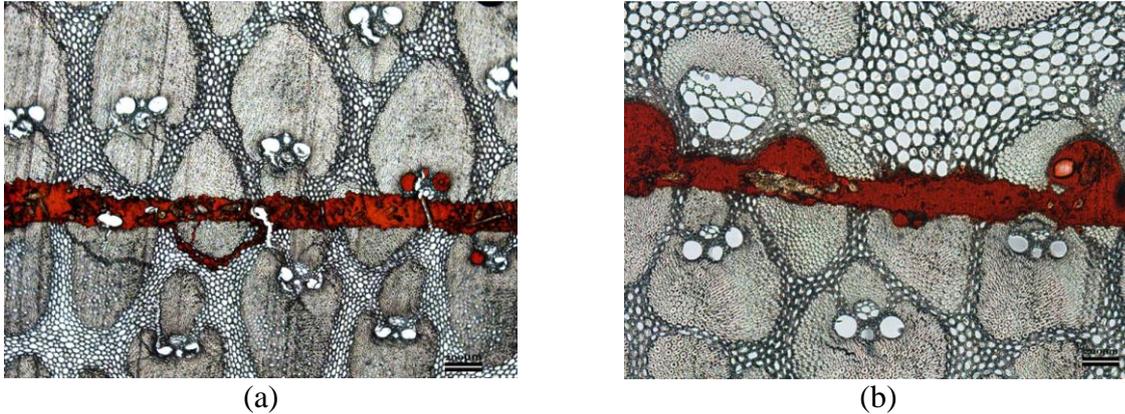


Figura 121 – Dispersão do adesivo nos tecido anômicos das lâminas dentro da combinação de colagem e=e (a) e com os vasos da lâmina interna dentro da combinação de colagem e=i (b)

Nos resultados de resistência ao cisalhamento no plano de cola, a combinação de colagem que apresentou mais vantagens na adesão entre lâminas para as três pressões estudadas foi a e=e. Verificou-se, nos cortes da referida combinação de colagem, que geralmente o adesivo preenche os vasos próximos da linha de união entre as lâminas em todo o comprimento da linha de cola. Houveram ocorrências em que mesmo distantes da linha do adesivo, alguns vasos do metaxilema foram preenchidos pelo adesivo. A Figura 122 serve como exemplo para se notar que o adesivo (de cor vermelha) preencheu os vasos próximos e alguns distantes da linha contínua de adesivo. A forma com que o adesivo alcançou e preencheu esses vasos, especialmente os localizados fora da linha de cola, não pôde ser explicada, porque o trajeto percorrido pelo adesivo não foi visualizado. Embora não se tenha evidência do percurso do adesivo nos elementos celulares, é provável que os vasos distantes da linha contínua do adesivo, tenham sido preenchidos através das pontoações das células.

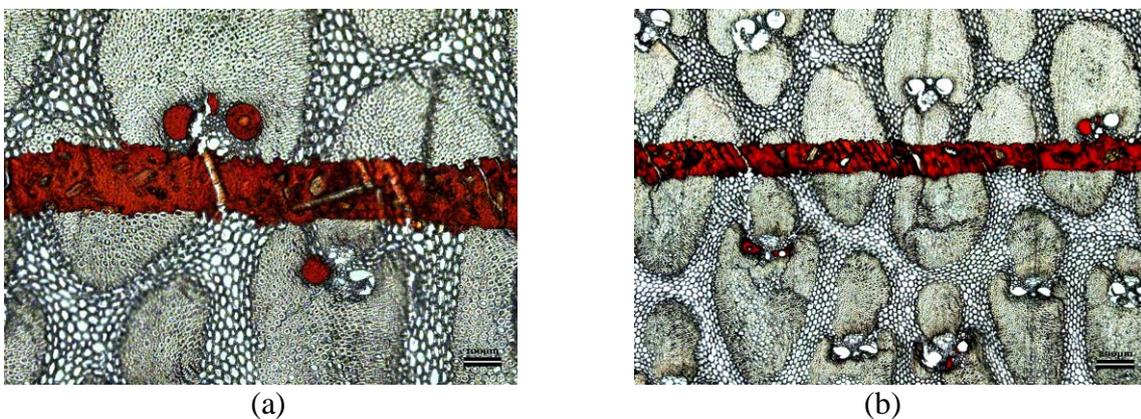


Figura 122 – Combinação de colagem do tipo e=e com vasos próximos (a) e distantes (b) da linha de adesão e preenchidos pelo adesivo

A interação do adesivo com os elementos anatômicos da camada externa da lâmina provoca uma ligação eficiente ao enlaçar alguns feixes de fibras junto à linha de cola. Esse enlace pode ocorrer também através de fissuras existentes nas lâminas. A ancoragem é, portanto, aparentemente eficaz por envolver conjuntos de fibra através de fissuras de um tecido resistente, mas na realidade não foi possível avaliar o efeito favorável ou desfavorável dessas microfissuras que são encontradas de forma frequente nos feixes fibrosos. A Figura 123 mostra exemplos de ancoragem do adesivo em feixes de fibras fissurados de ambas as lâminas que compõem um corpo de prova com a combinação de colagem e=e. Notou-se, na Figura 123 (a) que o adesivo atingiu os vasos através das fissuras existentes entre conjuntos de fibras e, na Figura 123 (b) observou-se que o adesivo enlaçou partes dos feixes de fibras adjacentes à linha contínua de adesão.

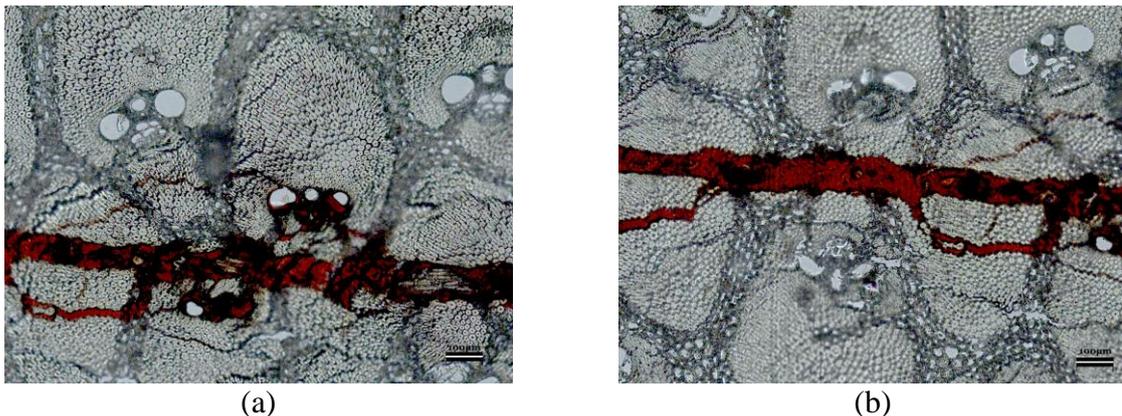


Figura 123 – Combinação de colagem do tipo e=e com lâminas que apresentam feixes de fibras fissurados e preenchidos pelo adesivo

Em lâminas que não apresentaram fissuras nos seus feixes de fibras o adesivo formou uma ligação aparentemente resistente envolvendo os feixes de fibras para junto da linha contínua do adesivo. A Figura 124 (a) exemplifica esse tipo de ligação em que o adesivo contornou um dos feixes de fibras, possibilitando a visualização do seu percurso em relação à sua linha central. A Figura 124 (b) refere-se a outro exemplo da dispersão do adesivo por entre um dos feixes de fibras, notando-se que o espalhamento do adesivo ocorreu através de células parenquimáticas e da fissura existente no feixe de fibras.

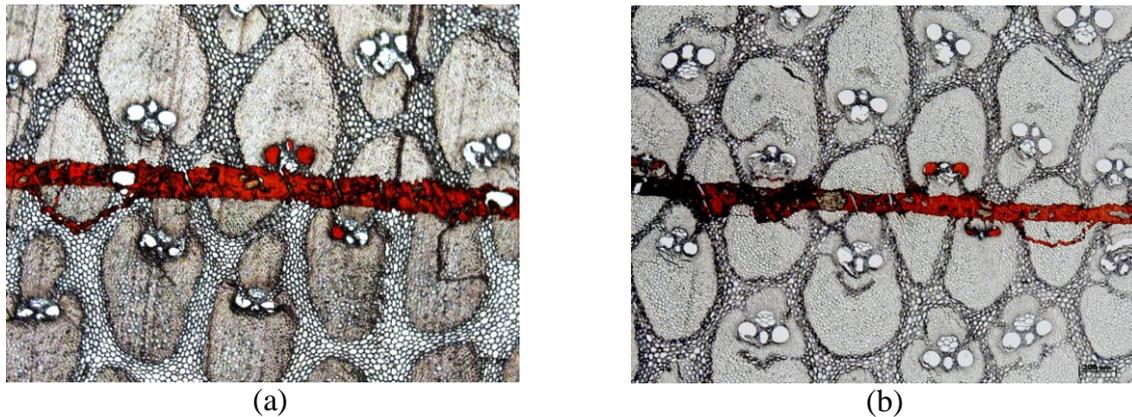


Figura 124 – Combinação de colagem do tipo e=e com o adesivo circundando um dos feixes de fibras (a) e passando por entre fibras de um feixe através de uma fissura (b)

Na combinação de colagem e=i o adesivo raramente envolveu um ou mais feixes de fibras das lâminas, como ocorreu na combinação de colagem e=e, exceto quando os feixes de fibras das lâminas apresentavam fissuras. Observou-se, nas Figuras 125 (a) e (b), que o adesivo preencheu as diversas fissuras dos elementos anatômicos da lâmina e que tal fato ocorreu sistematicamente do lado da camada externa.

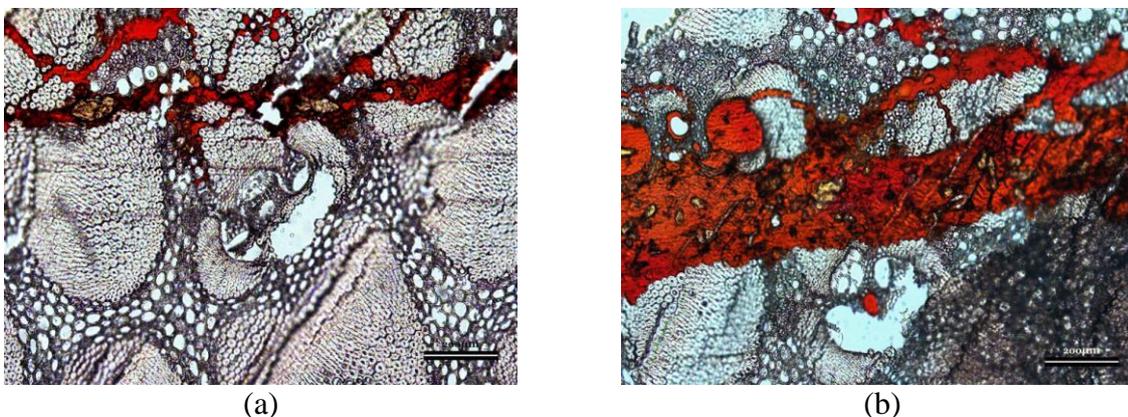


Figura 125 – Combinação de colagem do tipo e=i com o adesivo preenchendo as fissuras encontradas em feixes de fibras (a) e preenchendo os vasos através das células do parênquima e de fissuras nos feixes de fibras (b)

Nos trechos nos quais os vasos do xilema estavam localizados próximos à linha de cola, o adesivo preencheu o interior dos vasos da camada interna da lâmina, fazendo com que nesses trechos o adesivo migrasse para elementos anatômicos da camada interna da lâmina (Figuras 126 (a) e (b)) e, nos trechos em que não havia a presença de vasos na lâmina interna próxima a linha de cola, o adesivo migrou para as células da lâmina externa (Figuras 126 (c) e (d)). Notou-se que a presença de grande área de vasos absorve muito adesivo e que se a gramatura

não for suficientemente adequada não haverá adesivo em quantidade suficiente para enlaçar os feixes ou mesmo os menores conjuntos de fibras.

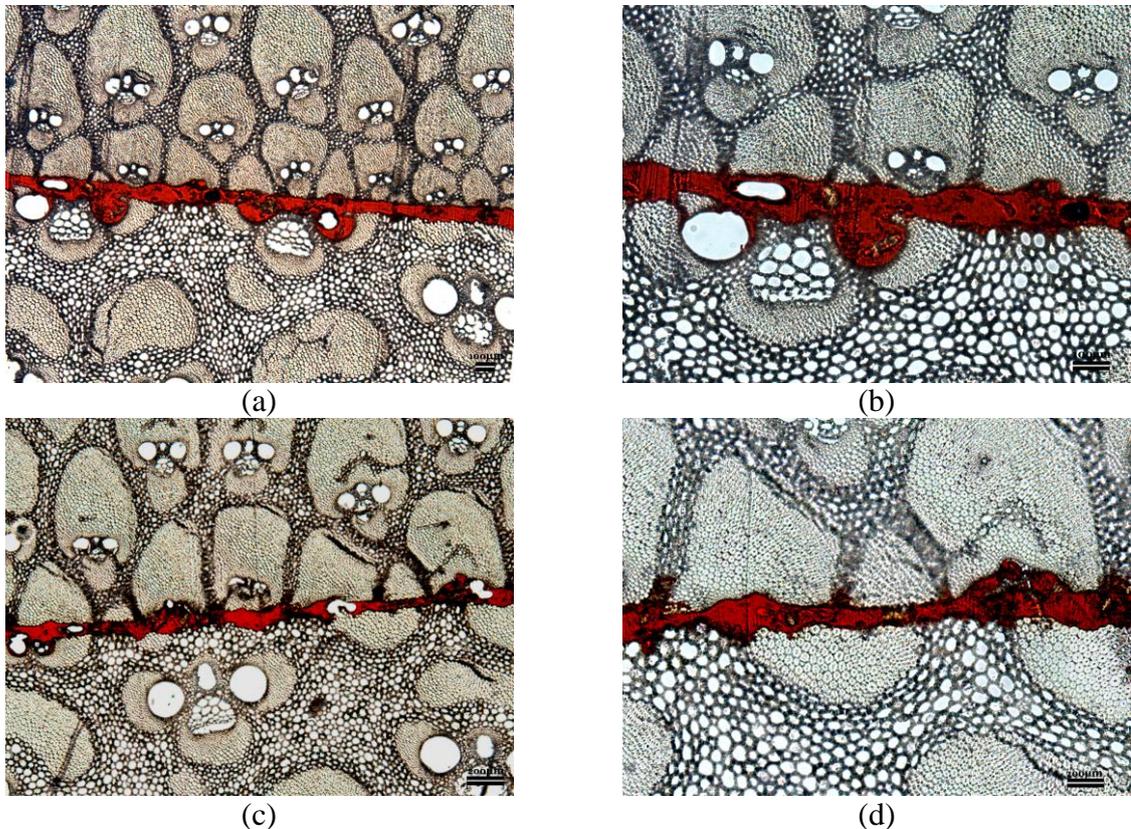


Figura 126 – Adesivo preenchendo vasos do xilema na camada interna da lâmina numa ligação e=i (a), detalhe da maior expansão do adesivo na camada interna (b), ancoragem do adesivo em células parenquimáticas e vasos da camada externa da lâmina (c) e detalhe desse preenchimento (d)

A combinação de colagem i=i apresentou-se como a menos favorável à resistência ao cisalhamento dentre as 3 combinações estudadas para a ligação entre lâminas, pois os elementos anatômicos de ambas as lâminas possuem diâmetros largos e, quando o adesivo penetra nas células acaba efetuando sua ancoragem em vasos tanto do xilema quanto do floema, os quais possuem paredes celulares mais frágeis à ruptura e, portanto, sendo menos resistentes do que as fibras. Notou-se que o adesivo se distribuiu de forma uniforme em ambas as lâminas do corpo de prova. Observou-se, na Figura 127 (a), que o adesivo ocupou em uma das lâminas os dois vasos do metaxilema e, na outra, o protoxilema e um dos vasos do metaxilema. Na Figura 127 (b), observou-se que em uma das lâminas o adesivo contornou parcialmente o feixe de fibras através das células do parênquima, e que em um dos vasos do metaxilema, o adesivo contornou somente sua parede interna, diferentemente do outro vaso

no qual o adesivo ocupou todo seu espaço interno. Na outra lâmina o adesivo preencheu os dois vasos do metaxilema e também contornou o vaso de um outro feixe vascular.

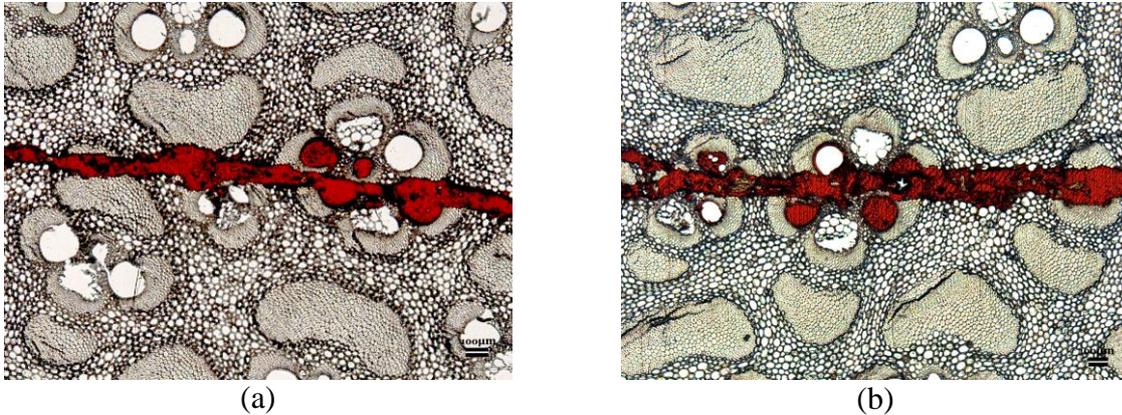


Figura 127 – Combinação de colagem do tipo i=i com o adesivo preenchendo vasos do metaxilema de ambas as lâminas (a) e a ancoragem do adesivo circundando parte de um feixe de fibras através de células parenquimáticas de uma das lâminas e em vasos do metaxilema próximos da linha do adesivo (b)

Em trechos em que não haviam vasos sendo tangenciados pela linha de cola, a ancoragem ocorreu nas células do parênquima, como mostrado na Figura 128 (a), ou em células do floema como se observou na Figura 128 (b).

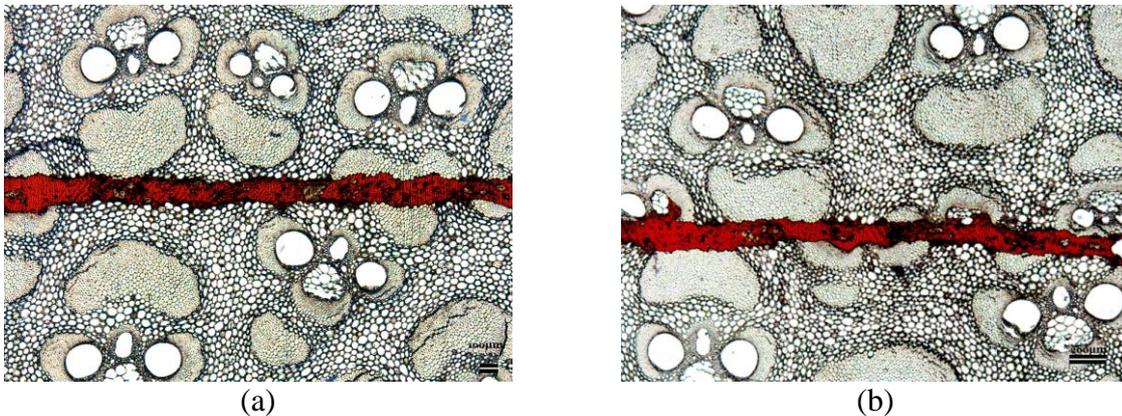


Figura 128 – Combinação de colagem do tipo i=i com o adesivo preenchendo células parenquimáticas próximas (a) e preenchendo alguns dos floemas localizados próximos à linha do adesivo (b)

Notou-se que dentro da combinação i=i alguns feixes de fibras das lâminas também apresentaram microfissuras (Figura 129 (a)) e que o adesivo enlaçou algumas células parenquimáticas de uma das lâminas, passando por entre as fibras do cordão do esclerênquima que circunda os vasos até preencher os próprios vasos. Na outra lâmina o adesivo chegou até os vasos através das células do parênquima e do protoxilema. Na Figura 129 (b), observou-se

que o adesivo percorreu fissuras e chegou a preencher alguns lumes de fibras e o interior de algumas células parenquimáticas.

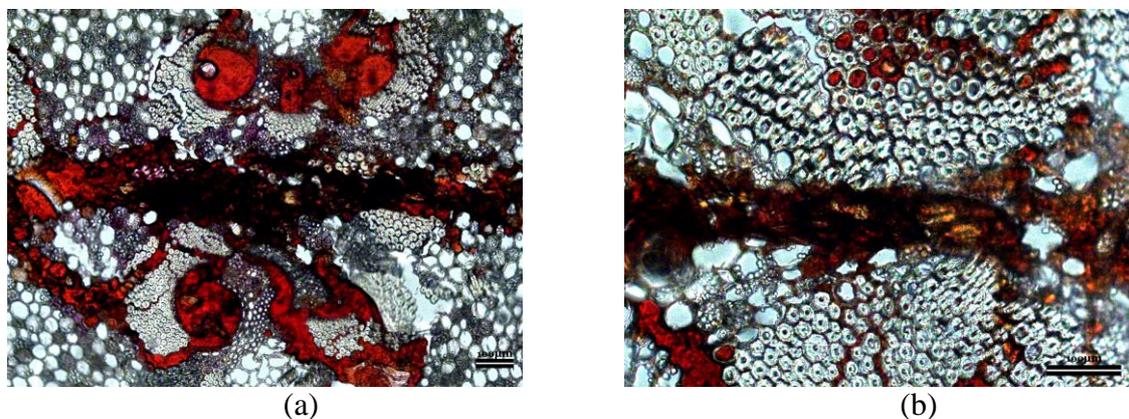


Figura 129 – Combinação de colagem do tipo i=i com o tecido anatômico apresentando fissuras em ambas as lâminas e o adesivo preenchendo vasos através de fissuras e células parenquimáticas (a) e preenchendo fissuras e os lumes de algumas fibras (b)

#### 4.2.4.2 Análise sob a Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

Na combinação de colagem do tipo e=e percebeu-se, nas micrografias do MEV, que as lâminas coladas apresentavam seus feixes vasculares próximos uns dos outros e que a linha do adesivo criada entre elas não se apresentou de forma marcante como a observada na microscopia óptica, mas o contrário ocorreu na visualização das fissuras do tecido lenhoso do material bambu. Foi importante observar fissuras aparentemente prejudiciais em determinadas áreas dos feixes de fibras e, sistematicamente, em regiões próximas à linha do adesivo, que parecem ser oriundas mais de colapso do que da pressão aplicada na colagem do corpo de prova. Na Figura 130 (a), observou-se que o adesivo RF preencheu vasos e, que ao longo da sua linha contínua, alguns feixes de fibras, especialmente em uma das lâminas, apresentavam fissuras. Houve trechos em que o adesivo não formou uma linha retilínea, e que na região onde os vasos do metaxilema das duas lâminas coincidiam de estarem na mesma direção, o adesivo se espalhou ocupando parte do espaço vazio dos 4 vasos formando uma faixa larga de adesivo (Figura 130 (b) e (c)). Percebeu-se que as fissuras ocorriam com frequência, porém não em toda a amostra e geralmente sem distribuição previsível, mas com frequência ocorriam paralelamente e próximas à linha do adesivo (Figura 130 (d)).

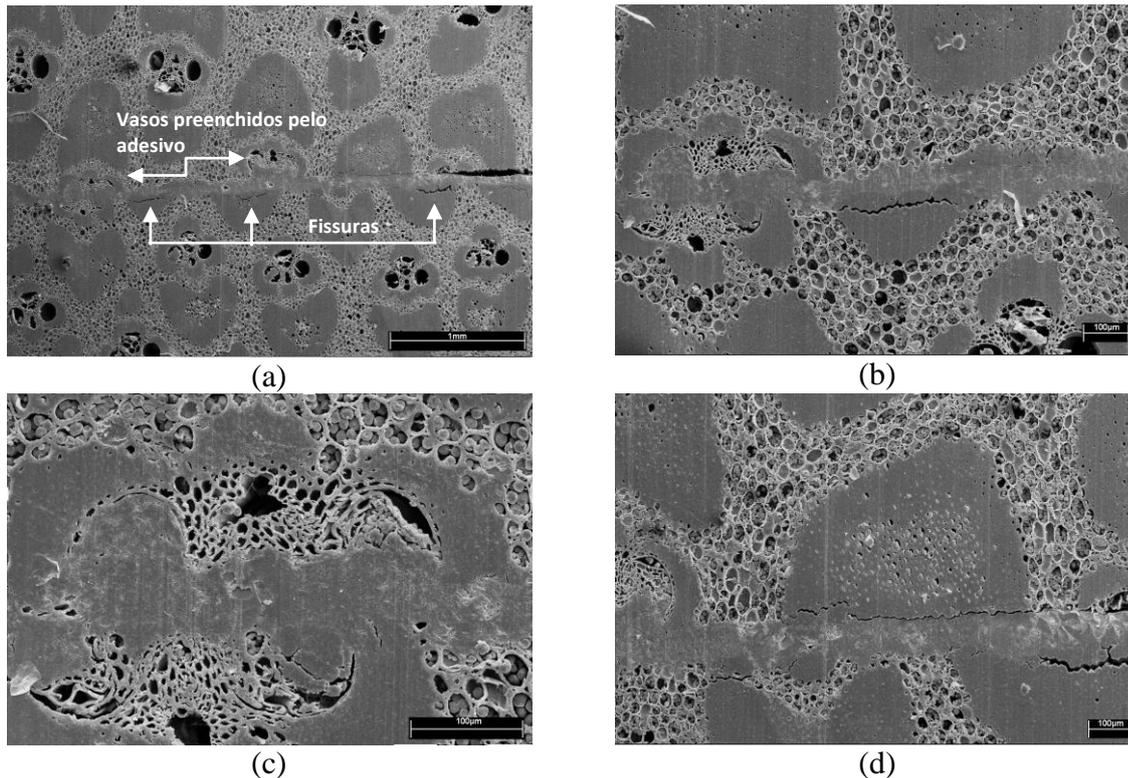


Figura 130 – Seção transversal do corpo de prova colado segundo a combinação de colagem e=e (a) com fissuras paralelas e próximas à linha do adesivo (b), espalhamento do adesivo numa região rica em vasos (c) e detalhe de uma fissura paralela e próxima à linha de adesão (d)

A segunda ligação mais efetiva foi conseguida com o adesivo RF com a combinação de colagem e=i. Os resultados do cisalhamento na linha de cola permitem afirmar que a adesão é eficiente em pelo menos uma das lâminas, geralmente na face da lâmina que possui os feixes vasculares menores e próximos uns dos outros, ou seja, nas camadas externas. Nessa combinação foi possível observar a diferença entre lâminas em relação à distribuição de seus feixes fibrovasculares e dos tamanhos de suas células (Figura 131 (a)). Notaram-se falhas na linha do adesivo possivelmente decorrentes do processo de colagem (Figura 131 (b)), o que permite pressupor que esse tipo de falha pode ter ocorrido em todas as combinações de colagem, especialmente nos corpos de prova que apresentaram baixa resistência ao cisalhamento no plano de cola. Na Figura 131 (c), observou-se que a linha de adesivo entre duas lâminas tendeu a ocupar células menores da camada externa da lâmina e, na Figura 131 (d), apresentam-se os detalhes de outra região, onde o adesivo tendeu a ocupar os espaços das células parenquimáticas da camada interna da lâmina.

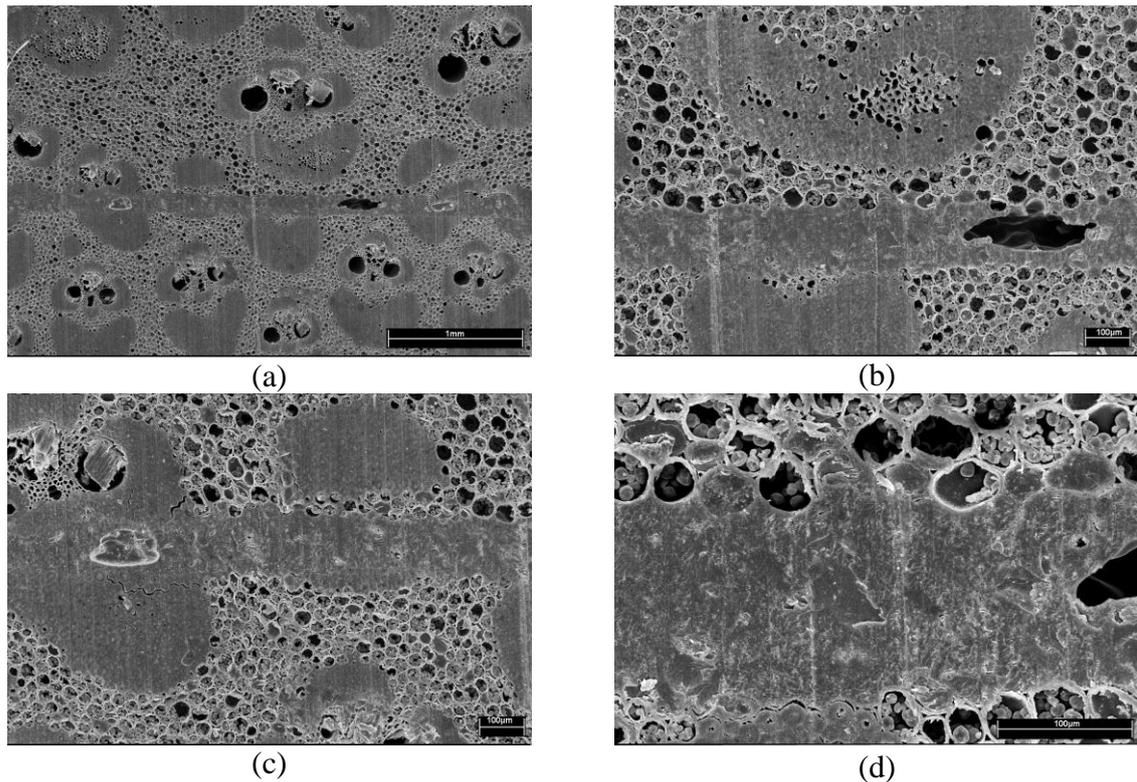


Figura 131 – União de lâminas na combinação e=i (a), com falha de colagem (b), células parenquimáticas preenchidas com adesivo na lâmina externa (c) e na lâmina interna (d)

Dentre as combinações de colagem aquela que propiciou a obtenção de laminado com menor resistência de cisalhamento na linha de cola foi a  $i=i$ . O adesivo RF apresenta características estruturais e alta resistência de ligação quando atua em regiões de fibras, mas quando o adesivo penetra na região de parênquima, vasos e floema, ele ancora justamente no tecido mais fraco da lâmina, resultando em uma ligação com resistência aquém da esperada, ou seja, de nada adianta o adesivo apresentar alta resistência se o tecido em que ele ancora é menos resistente que ele próprio. Observou-se, na Figura 132 (a), que a fina linha do adesivo não ocorreu de forma retilínea na amostra, permitindo pressupor que houve uma acomodação do corpo de prova colado às condições de prensagem não uniforme. A Figura 132 (b) refere-se à região da direita da Figura 132 (a), em detalhe, para evidenciar a existência de linha contínua do adesivo na região dos feixes de fibras. Notou-se, na Figura 132 (c), que a ancoragem do adesivo ocorreu tangenciando um dos feixes de fibras. Na Figura 132 (d), o adesivo não preencheu as células do parênquima de maneira contínua. Nas Figuras 132 (e) e (f), foram observadas fissuras nos feixes de fibras próximos à linha do adesivo e com mais detalhes na Figura 132 (g), onde também se notou a transição do adesivo da região de fibras para região das células parenquimáticas. Na Figura 132 (h) observou-se um trecho da linha do adesivo não retilínea nas células parenquimáticas.

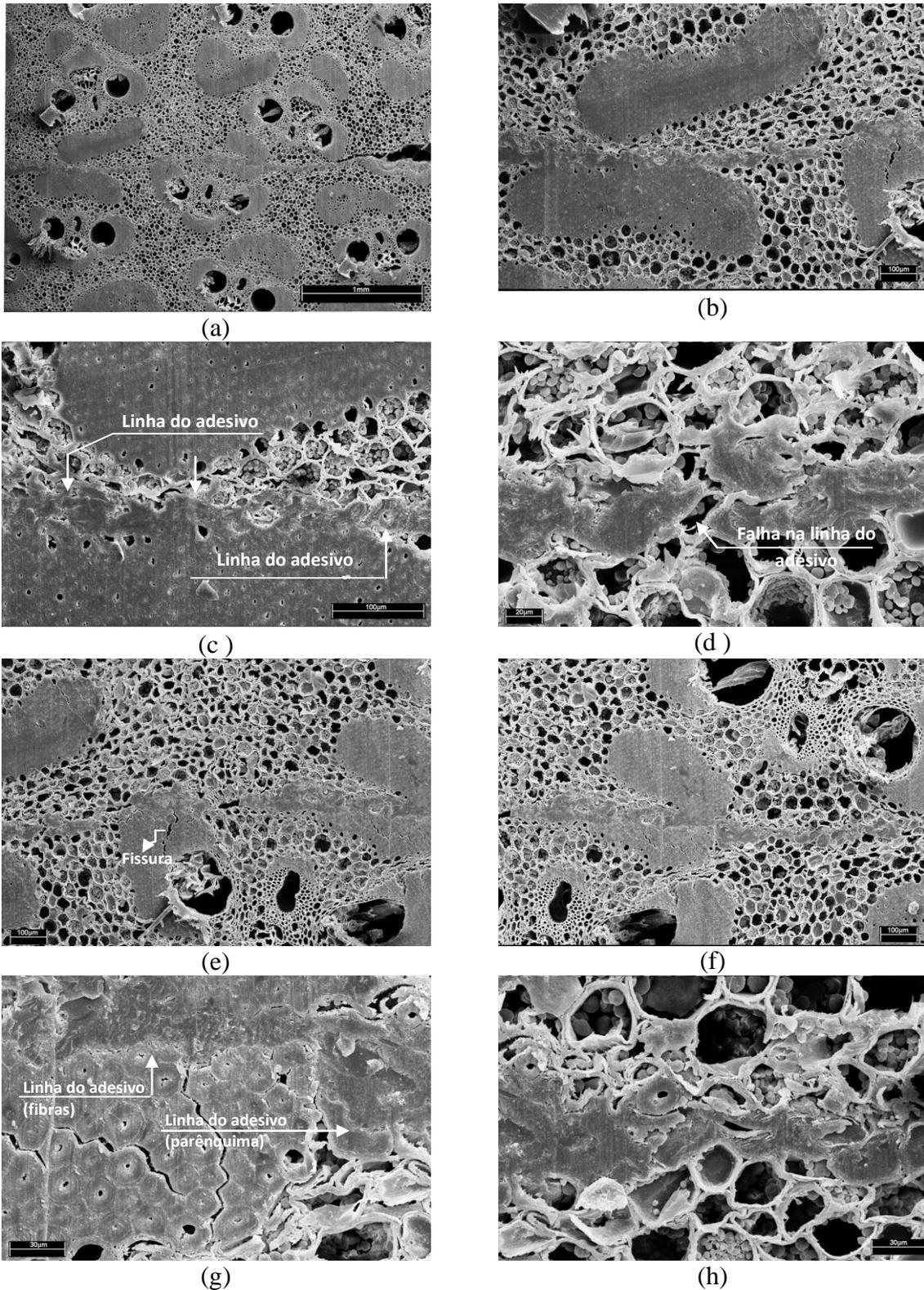


Figura 132 – União de lâminas na combinação i=i (a), com fissuras nos feixes de fibras próximas à linha do adesivo (b) / (e) / (f), continuamente na região dos feixes de fibras (c) / (g), com falha de colagem no tecido do parênquima (d) e preenchimento do adesivo nas células do parênquima (h)

#### 4.2.4.3 Análise sob a microscopia de fluorescência

A adição de rodamina ao adesivo possibilitou comprovar as formas segundo as quais ocorreu a ancoragem do adesivo nos elementos anatômicos das lâminas, discutidas na microscopia óptica, devido à fluorescência decorrente da substância. Em algumas amostras o adesivo apresentou-se de cor opaca porque talvez a rodamina tenha perdido seu efeito ao entrar em contacto com a água usada para cortes das lâminas no micrótomo ou porque talvez a substância não tenha sido devidamente misturada ao adesivo, ficando a mistura com alguns pontos menos fluorescentes do que outros ao longo da linha de adesão. Foi constatado para a combinação de colagem e-e que a linha de cola se ramificou e envolveu os feixes de fibras constituindo-se numa característica típica da ancoragem do adesivo na face considerada como sendo a mais externa da lâmina. Na Figura 133 (a), observou-se, como também aconteceu na microscopia óptica, que a linha de cola, tornada fluorescente para melhor visualização, envolveu dois feixes de fibras da lâmina inferior, e que vasos do metaxilema foram preenchidos pelo adesivo de cor opaca. A diferença na intensidade da fluorescência observada nas ramificações do adesivo indica a necessidade de um melhor controle tanto na homogeneidade da mistura quanto na distribuição uniforme do adesivo na superfície a ser colada. Na Figura 133 (b), observou-se, em outra amostra, que a linha do adesivo de cor opaca, ramificado na cor fluorescente, envolveu um dos feixes de fibras da lâmina superior do corpo de prova. Na Figura 133 (c), foram observados pontos fluorescentes que são característicos do adesivo, como aquele onde se inicia a ramificação que circunda um feixe de fibra da lâmina inferior. Porém, esses pontos fluorescentes observados na amostra, que apareceram longe da linha contínua da adesão, não podem ser considerados como sendo parte do adesivo, pois não houveram evidências do percurso do adesivo para alcançá-los. Na Figura 145 (d), observou-se com detalhes o preenchimento de vasos do metaxilema próximo à linha do adesivo, mas não se pôde avaliar o trajeto efetuado pelo adesivo até alcançar os vasos.

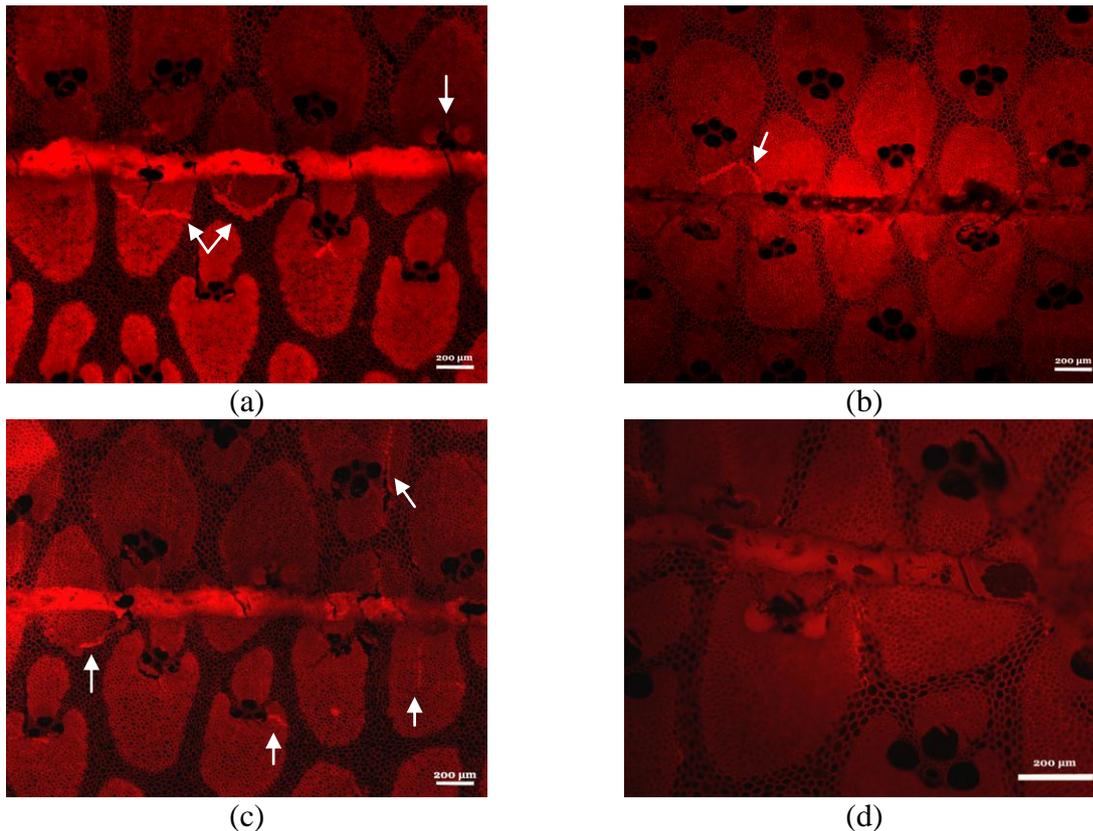


Figura 133 – Fluorescência provocada no adesivo para visualização das alças que envolvem conjuntos de fibras via fissura ou todo o feixe de fibras via parênquima (a), (b) e (c) na combinação de colagem e=i e com o adesivo preenchendo vasos do metaxilema (d)

Nas análises das imagens geradas no microscópio de fluorescência observou-se, com nitidez, que o adesivo fluorescente praticamente ancorou nas lâminas externas das amostras analisadas. Na combinação de colagem e=i, o adesivo penetrou em células parenquimáticas da camada externa da lâmina, chegando a ocupar parte da faixa do tecido parenquimático situada entre dois feixes de fibras e alcançando áreas próximas de vasos do metaxilema mesmo quando se apresentassem distantes da linha contínua do adesivo (Figuras 134 (a) e (b)). Na combinação de colagem e=i, foi possível observar que a linha do adesivo se situou entre uma área sequencial de fibras e outra rica em células do parênquima separando feixes fibrovasculares com maiores distâncias entre eles, o que fez com que o adesivo tivesse maior interação com as células das camadas externas das lâminas. Na Figura 134 (c), verificou-se o adesivo fluorescente ocupando os vasos do metaxilema e o floema de um dos feixes vasculares da camada externa da lâmina e, na camada interna da lâmina, o adesivo ancorou em parte do floema próximo à linha do adesivo. Na Figura 134 (d), notou-se que o adesivo preencheu os vasos e o floema de um dos feixes vasculares da camada externa da lâmina, e

que ocupou os espaços entre os feixes constituídos por tecido parenquimático, contornando parte dos feixes.

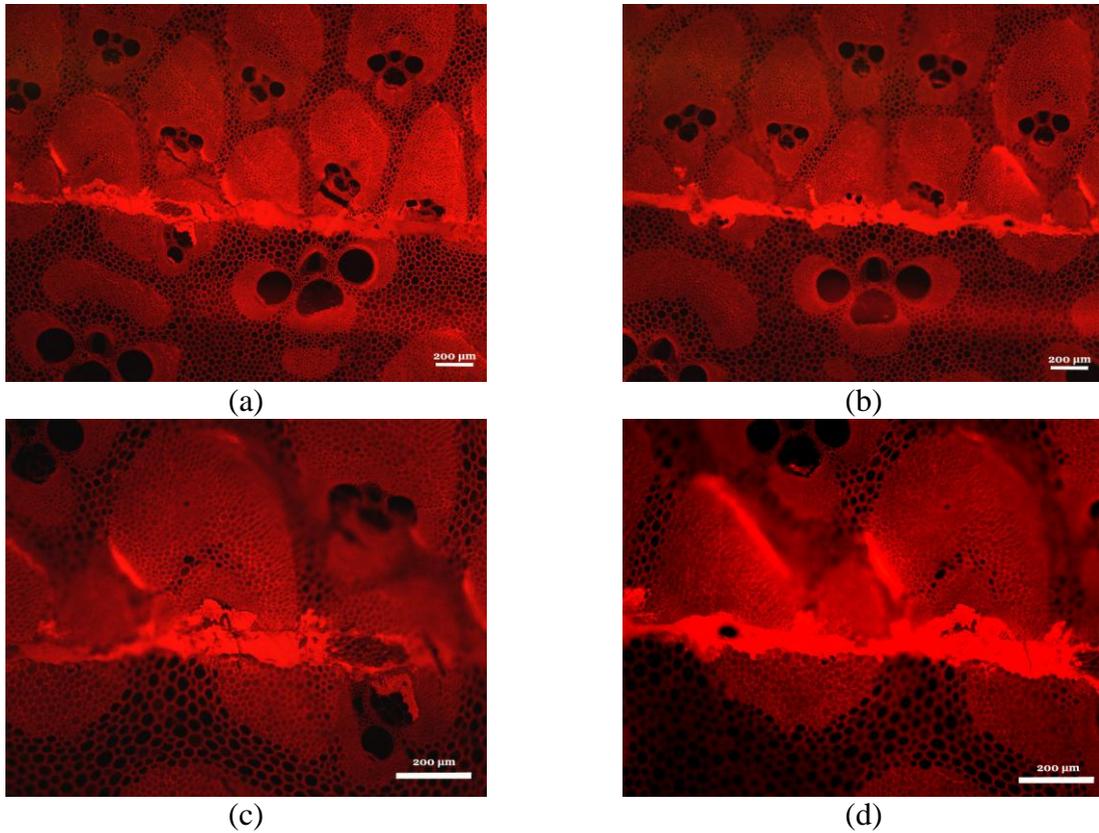


Figura 134 – Adesivo fluorescente realçando a combinação de colagem e=i com o adesivo ramificando na camada externa da lâmina (a) e (b), preenchendo os vasos do metaxilema (c) e contornando parte dos feixes de fibras da camada externa da lâmina (d)

Na Figura 135 (a), notou-se que o adesivo preencheu os vasos junto à linha do adesivo e, na Figura 135 (b), observou-se que o adesivo contornou feixes de fibras fluindo através do tecido parenquimático de borda e que contornou grupos de fibras fluindo por fissuras que atravessam o próprio feixe de fibras. O preenchimento dos vasos pelo adesivo pode ser observado com detalhes nas Figuras 135 (c) e (d).

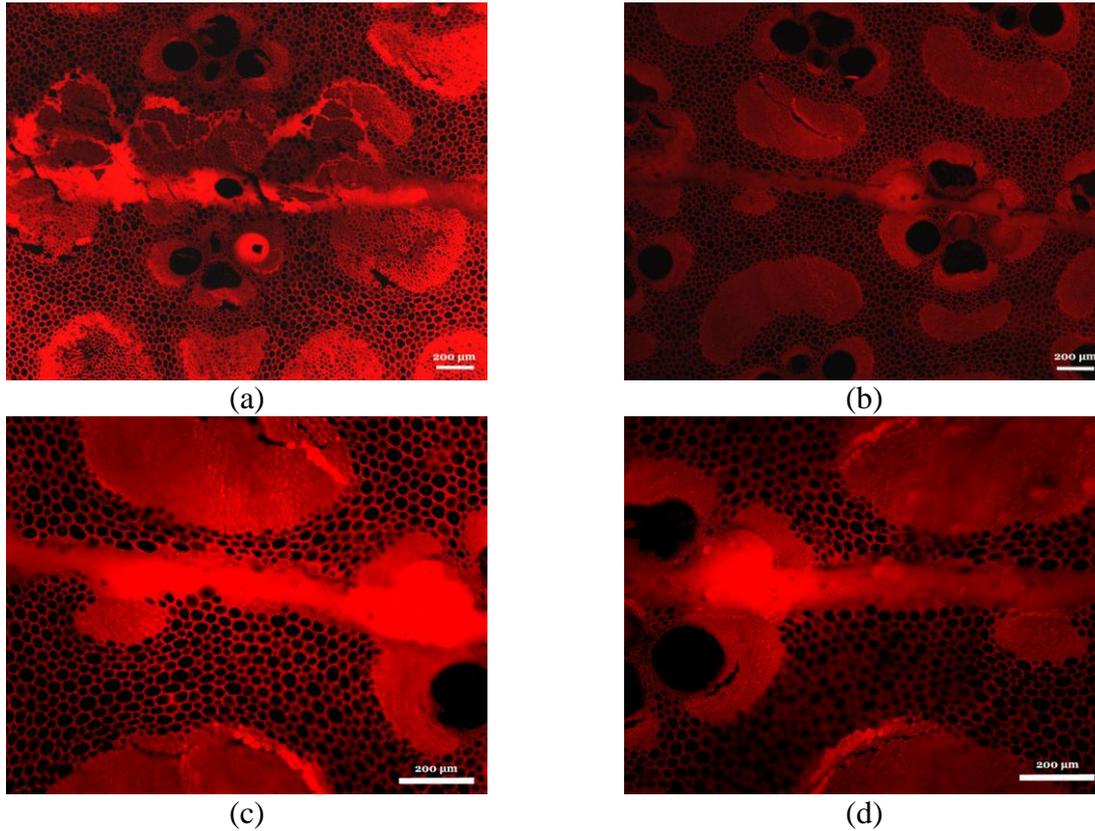


Figura 135 – Adesivo fluorescente na combinação de colagem e fluido por fissuras ou pelo parênquima de borda (a) e preenchendo os vasos do metaxilema (b), (c) e (d)

### 4.3 Flexão

#### 4.3.1 Ripa

O colmo pode ser basicamente subdividido transversalmente em 3 camadas. A primeira refere-se a uma camada delgada localizada na epiderme, denominada de camada externa; a segunda é uma película que recobre a superfície interna da parede do colmo, denominada de camada interna e o restante, ou seja, toda a parede do colmo que constitui a camada central. A camada externa é composta por uma disposição compacta de células que formam uma camada resistente a choques mecânicos, às intempéries, ao ataque de insetos e que restringe a perda de água. As células dessa camada são frequentemente revestidas por uma camada de cutina (mistura insolúvel que contém cera), de celulose e pectina, com lamela tangencial formando uma cobertura cerosa. Nessa camada há grande quantidade de células contendo alto teor de dióxido de silício que fortalece a camada epidérmica. A camada mais interna da parede do colmo, ou seja, a membrana terminal, adjacente à cavidade central, é composta, praticamente, por células do parênquima altamente lignificadas. Suas paredes são, frequentemente, muito

espessas e contêm também pontos de sílica, porém em menor quantidade do que aqueles encontrados na periferia do colmo. No ensaio mecânico de flexão estática, observou-se que as camadas mencionadas desenvolveram importantes papéis. Notou-se nos corpos de prova que a camada externa resistiu fortemente ao esforço de compressão normal imposto pelo aplicador de carga de flexão, chegando em alguns casos a deslocar-se de sua posição regular. Observou-se que a ruptura da ripa iniciou-se na camada terminal interna, migrando em seguida para as fibras. Os corpos de prova internodais, de uma forma geral, foram mais resistentes do que os nodais. Nos corpos de prova com nós a película terminal da camada interna foi eliminada na produção de ripas o que interrompeu a continuidade da camada interna e enfraqueceu a região tracionada no ensaio de flexão. A Figura 136 refere-se aos valores dos módulos de ruptura das repetições de ripas brutas com e sem nós e suas respectivas médias, observando-se que para a condição internodal a resistência à flexão variou de 61,18 a 258,86 MPa.

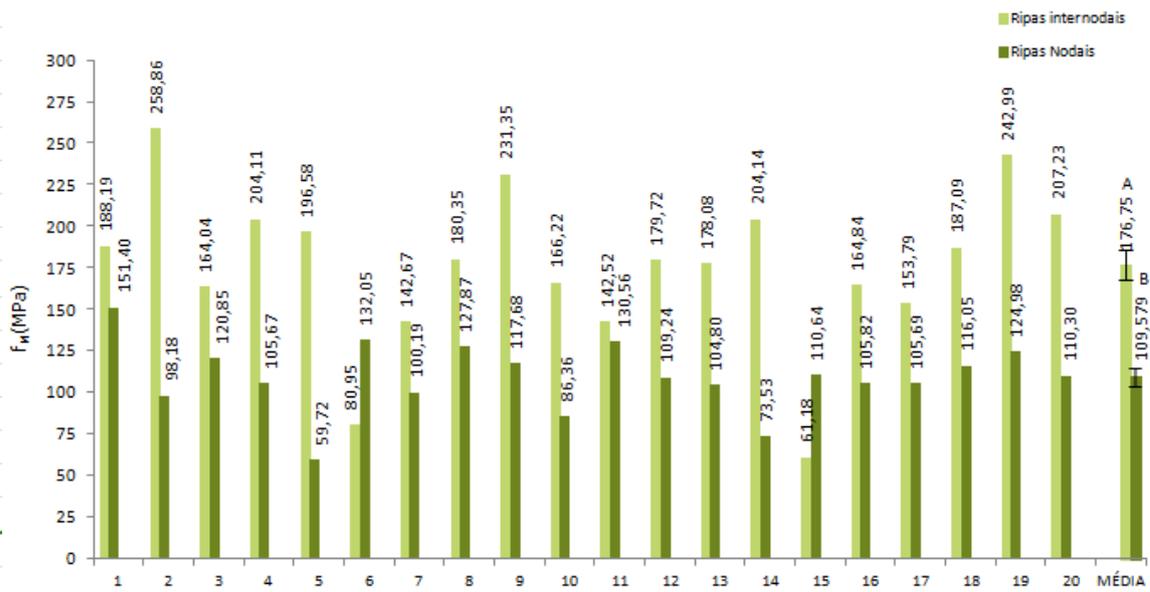


Figura 136 – Resistência à flexão estática ( $f_M$ ) de cada repetição de ripa bruta internodal e nodal e suas respectivas médias

A Figura 137 refere-se ao corpo de prova da repetição 19, o qual resistiu a 249,99 MPa, um dos melhores desempenhos de um lote de 20 ripas brutas. Observou-se, na Figura 137 (a) o corpo de prova sendo ensaiado com ruptura por tração na borda inferior. Na Figura 137 (b) notaram-se os detalhes da ruptura por compressão e de tração na borda lateral da ripa durante o carregamento à flexão. As Figuras 149 (c) e (d) referem-se ao corpo de prova após ruptura por flexão observando-se que a ruptura se iniciou na região tracionada e posteriormente na região comprimida.

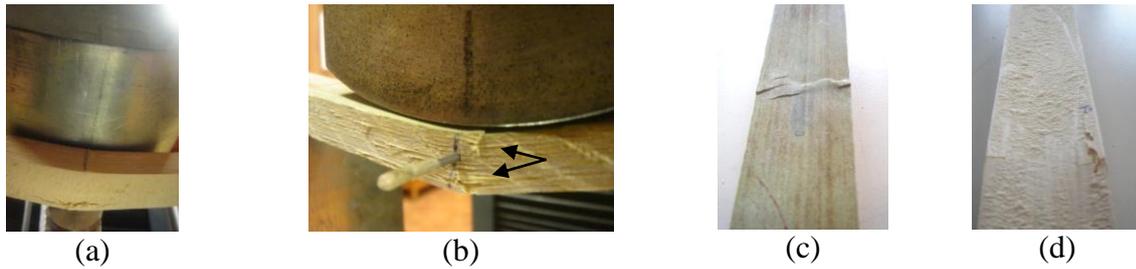


Figura 137 – Corpo de prova sob ensaio de flexão estática com ruptura na região tracionada da camada interna (a), com as evidentes rupturas por compressão e tração na borda lateral (b) e marcas oriundas do ensaio de flexão nas faces externa (c) e interna (d)

Na Figura 138 (a), observou-se que na região comprimida (camada externa) do corpo de prova a ruptura da casca por compressão ocorreu numa seção não plana e deslocada da seção de momento máximo. Nas Figuras 138 (b) e (c), respectivamente, foi observado que em uma das bordas do corpo de prova houve marca de compressão de forma pronunciada e, na borda oposta, houve marca de ruptura por tração. Na Figura 138 (d), observou-se que a camada terminal exerceu grande resistência à tração antes de transferir tensões para as fibras adjacentes superiores.

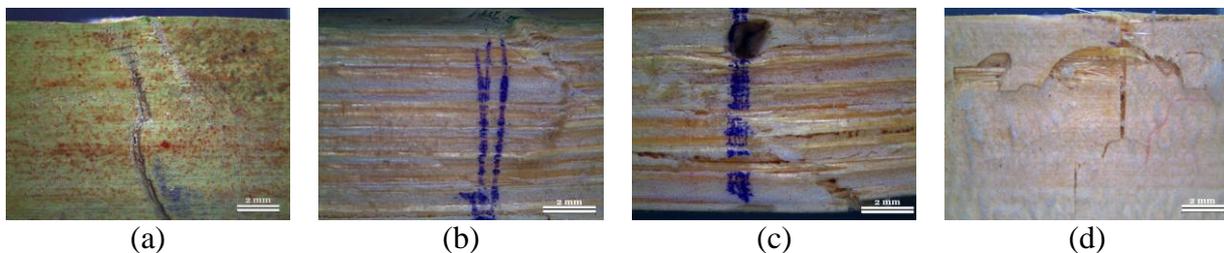


Figura 138 – Ruptura por compressão na face externa (a), em uma das bordas laterais (b) e marcas de tração na outra borda lateral (c) e na face interna (d) visualizados no ensaio de flexão de uma ripa

A ruptura do corpo de prova da repetição 17 ocorreu por tensão normal, atingindo o valor de resistência à flexão de 153,79 MPa. Observou-se, na Figura 139 (a), em uma das bordas do corpo de prova, a marca característica da ruptura por compressão no ponto do carregamento da carga. Na região tracionada, evidenciou-se a ruptura por tração, como mostrado na Figura 139 (b). As Figuras 139 (c) e (d) referem-se às rupturas observadas nas regiões mencionadas do corpo de prova da repetição 17.

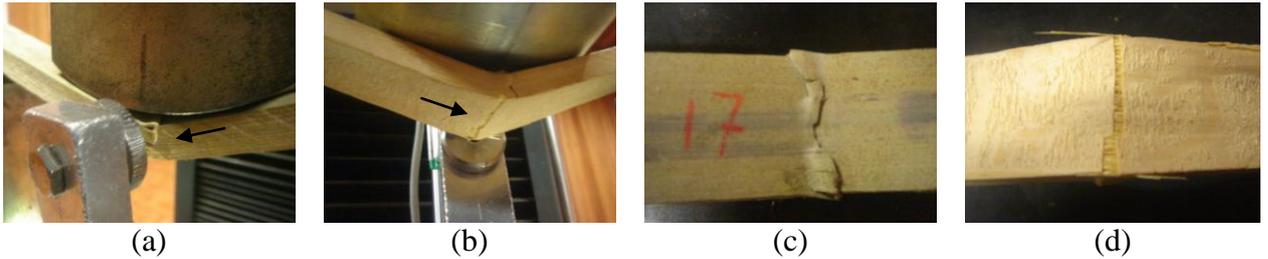


Figura 139 – Corpo de prova da repetição 17 no momento do ensaio de resistência à flexão (a) e (b) e as marcas de ruptura após o ensaio mecânico (c) e (d)

Com o auxílio de uma lupa foram observadas as rupturas nas regiões comprimida e tracionada do corpo de prova da repetição 17. Notou-se, nas Figuras 140 (a) e (b), que na face externa a camada da epiderme se descolou do lenho devido aos esforços de compressão, causando uma deformação progressiva no corpo de prova durante o ensaio. Na região tracionada do corpo de prova, notou-se que a ruptura ocorreu inicialmente na película terminal da camada interna e em seguida nas fibras do lenho (Figura 140 (c)). Os sinais característicos de que o corpo de prova rompeu-se também por tração normal são apontados na Figura 140 (d).

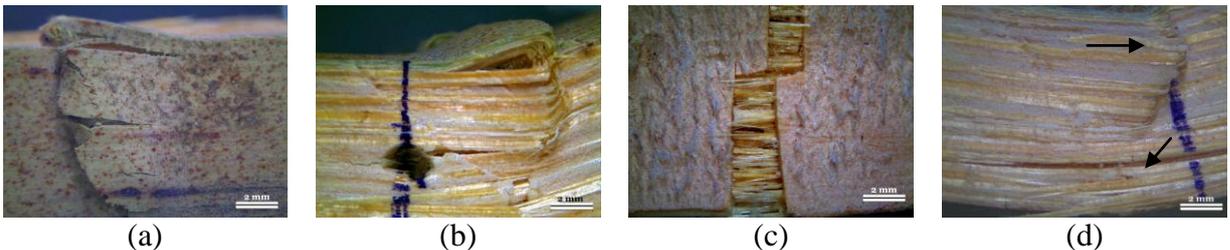


Figura 140 – Repetição 17 do corpo de prova sem nó com marcas de compressão (a) e (b) e de tração (c) e (d) após a ruptura por flexão da ripa

De uma forma geral as rupturas dos corpos de prova nodais ocorreram na região mais crítica do bambu, ou seja, os nós, os quais são caracterizados por desvios de fibras em relação ao eixo do colmo, que por sua vez, propiciaram as rupturas. Os módulos de ruptura das repetições dos corpos de prova com nós variaram de 59,72 a 151,40 MPa, sendo a média de resistência de 109,57 MPa. A repetição 15 foi eleita para demonstrar a típica ruptura observada na ripa com nó. Na Figura 141, pode-se notar na vista lateral da ripa, a ruptura na região tracionada do corpo de prova provocada durante o carregamento e em especial na Figura 141 (d), a ruptura por tração vista frontalmente na borda tracionada da ripa com nó.

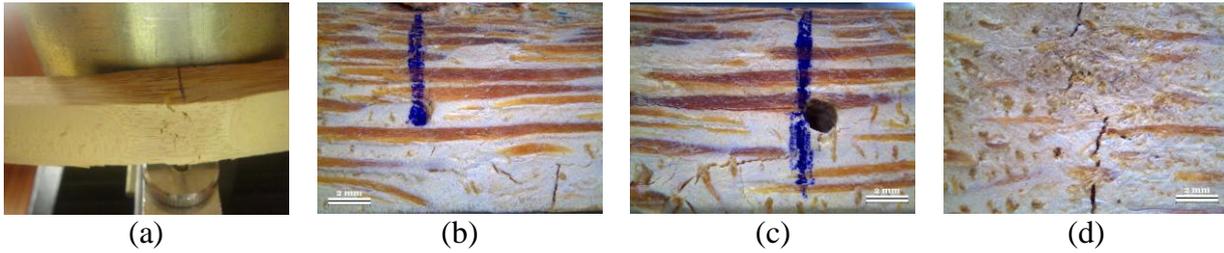


Figura 141 – Ensaio de resistência à flexão estática sendo aplicado no corpo de prova (a) com sinais de ruptura por tração em suas bordas laterais (b) e (d), e também com evidência do mesmo tipo de ruptura na face interna (c)

Embora a carga tenha sido aplicada na seção que continha o nó dos corpos de provas, em uma das repetições observou-se que a ruptura por tração migrou para a região internodal, e que a ruptura por compressão não ocorreu na região nodal, mas sim, na internodal. A repetição em questão foi a de número 8, a qual alcançou a resistência de 127,87 MPa, valor esse muito acima da média. Notou-se, na Figura 142 (a), a ruptura por compressão na região internodal vista na lateral do corpo de prova. Nas Figuras 142 (b) e (c) que mostram a borda tracionada, observou-se que a ruptura iniciou-se na região nodal, deslocando-se por cisalhamento para uma região fora do nó. Na outra lateral do corpo de prova (Figura 142 (d)), notou-se que a ruptura ocorreu por tração no tecido do parênquima e paralelamente às fibras.

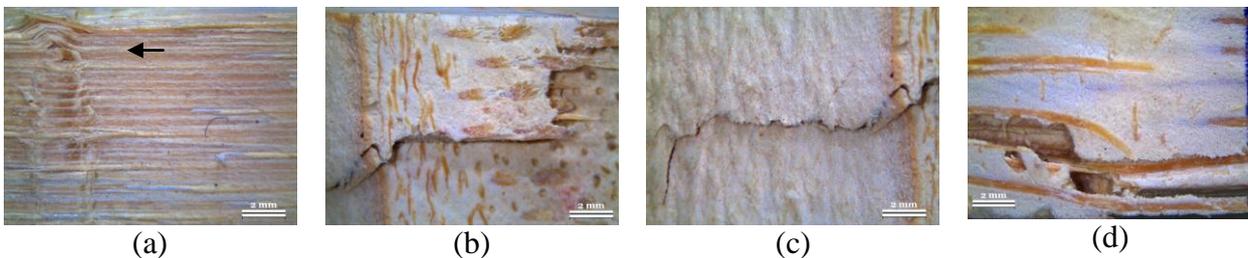


Figura 142 – Corpo de prova nodal (repetição 8) com sinais de ruptura por compressão na região internodal na vista lateral do corpo de prova (a), ruptura por tração na região do nó (b) e do entrenó (c) e ruptura no tecido parenquimático vista na outra lateral do da ripa com nó (d)

A Figura 143 refere-se aos módulos de elasticidade das repetições nodais e internodais e suas respectivas médias.

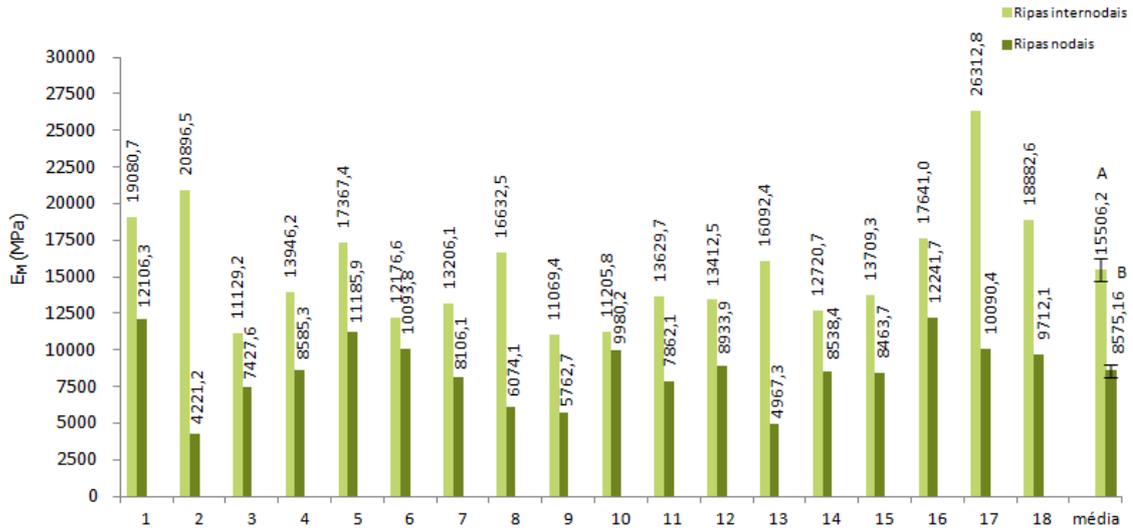


Figura 143 – Módulo de Elasticidade ( $E_M$ ) de cada ripa e as respectivas médias

Os módulos de elasticidade à flexão estática das ripas com e sem nós apresentaram variabilidade nas repetições. Nas repetições internodais oscilou entre 11.069,4 e 26.312,8 MPa, sendo que a média foi de 15.506,2 MPa. Nas repetições nodais, o módulo de elasticidade variou entre 4221,2 MPa e 12241,7 MPa, sendo a média de 8575,2 MPa. O teste de Tukey, considerando o nível de 5% de significância, diagnosticou diferença significativa entre os dois tipos de ripas, ou seja, internodais e nodais.

De uma forma geral, nos corpos de prova internodais, as rupturas ocorreram por tensões normais. A Figura 144 refere-se a um dos corpos de prova (repetição 2) internodal que mais resistiu às tensões do ensaio de flexão. A Figura 144 (a) refere-se ao ensaio de flexão estática sendo aplicado no corpo de prova da repetição mencionada. Observou-se na Figura 144 (b) que a ruptura causada pela tensão de compressão, ocasionou o deslocamento da camada externa no lenho. Esse deslocamento da casca em relação ao lenho, pode ser notado na borda lateral do corpo de prova, na Figura 144 (c). Observou-se, na Figura 144 (d) a ruptura na membrana terminal da camada interna do corpo de prova.

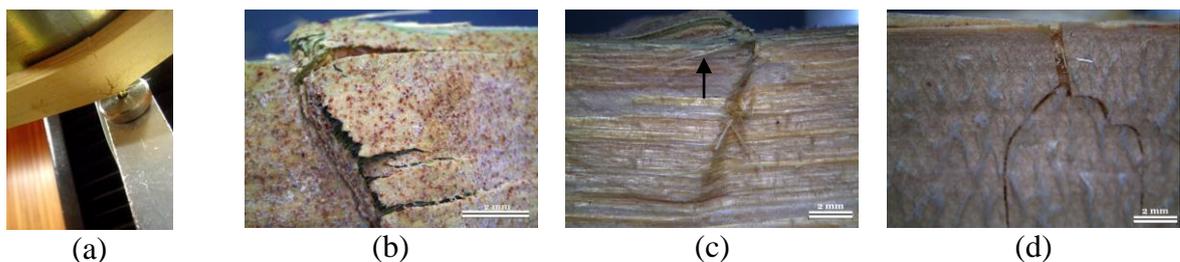


Figura 144 – Corpo de prova internodal da repetição 2 sob ensaio de flexão estática (a) e após o ensaio com sinais de ruptura por compressão na camada externa (b) e (c) e tração na camada interna (d)

O módulo de elasticidade do corpo de prova internodal, da repetição 5, foi de 17367,4 MPa. Na Figura 145 (a), notou-se que o corpo de prova da referida repetição, apresentou sinais de compressão na camada externa. Na camada interna do corpo de prova, observou-se ruptura por tração na membrana terminal (Figura 145 (b)). Em uma das laterais do corpo de prova, na Figura 145 (c), notou-se a ruptura no tecido parenquimático paralelo aos feixes de fibras da região tracionada e na outra lateral do corpo de prova, observou-se nitidamente a ruptura compressão na borda superior e por tração na inferior (Figura 145 (d)).

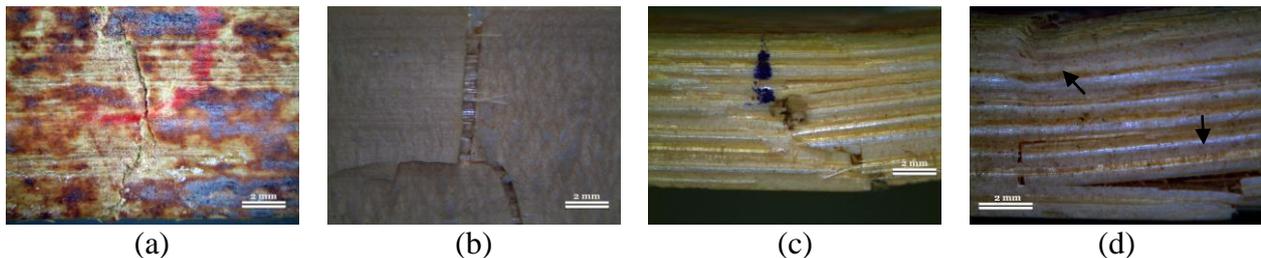


Figura 145 – Corpo de prova sem nó da repetição 5 com sinais de ruptura por compressão (a) na camada externa, tração na camada interna (b) e nas laterais (c) e (d)

Na maioria dos casos para os corpos de prova com nós as rupturas ocorreram por tração nos nós, especialmente no tecido parenquimático e, na maioria das vezes, as rupturas ocorreram paralelamente às fibras, não tendo sido observada a ruptura por compressão na camada externa. A Figura 146 refere-se ao corpo de prova da repetição 01, o qual apresentou 12.106,3 MPa no módulo de elasticidade. Nota-se na Figura 146 (a), o corpo de prova com aplicação de carga no momento do ensaio de resistência à flexão. Nas Figuras 146 (b) e (c), observou-se a ruptura no tecido do parênquima seguindo paralelamente às fibras e, na Figura 146 (d), a ruptura das fibras nos nós da camada interna. Neste caso a camada terminal não contribuiu com o ganho da resistência, pois a mesma havia sido retirada na etapa de produção dos corpos de prova do tipo nodal.

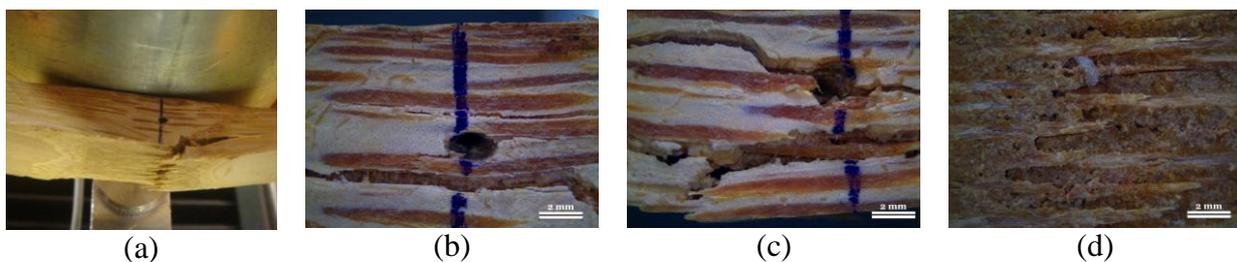


Figura 146 – Corpo de prova com nó da repetição 1 no momento do ensaio (a) e após a ruptura com sinais de ruptura por tração (b) e (c) nas bordas laterais e na camada interna (d)

A repetição 2 referente ao corpo de prova nodal, foi aquela que apresentou o menor módulo de elasticidade (4221,2 MPa). A Figura 147 (a) refere-se ao corpo de prova da repetição mencionada. Na Figura 147 (b), notou-se que a ruptura na camada interna deveu-se à tração no nó. Nas figuras 147 (c) e (d), as bordas laterais do corpo de prova apresentaram rupturas no tecido parenquimático contornando os feixes de fibras.

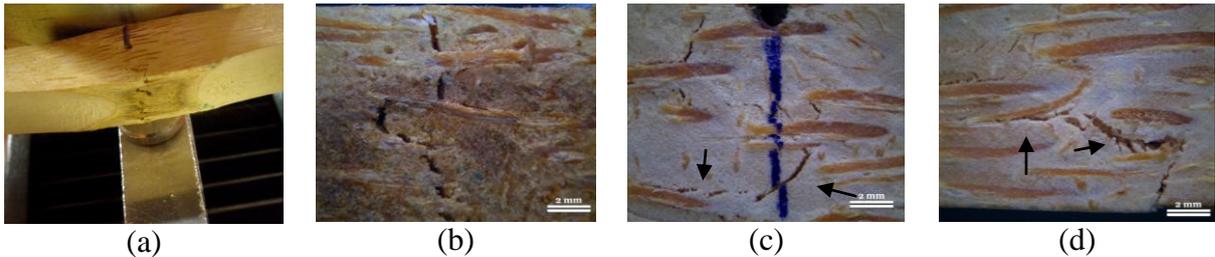


Figura 147 – Corpo de prova com nó da repetição 2 no momento do ensaio (a) e após a ruptura com sinais de ruptura por tração na camada interna (b) e nas bordas laterais (c) e (d)

#### 4.3.2 Lâmina

No processo de transformação de ripa bruta em lâmina, tanto nodal como internodal, eliminou-se as camadas externa e interna das ripas, uniformizando suas dimensões. Tal processamento mecânico acarretou na elevação da resistência à flexão tanto no módulo de ruptura, como no de elasticidade para as lâminas internodais, mas nas nodais ocorreu o oposto. A Figura 148 corresponde aos módulos de ruptura à flexão estática das repetições de lâminas nodais e internodais. Observou-se variação dos módulos de ruptura dentro e entre repetições, seguindo a mesma tendência encontrada nas ripas brutas, ou seja, as repetições internodais foram mais resistentes do que as nodais e significativamente diferentes, como representado por letras diferentes, no topo das respectivas colunas do gráfico da Figura 148.

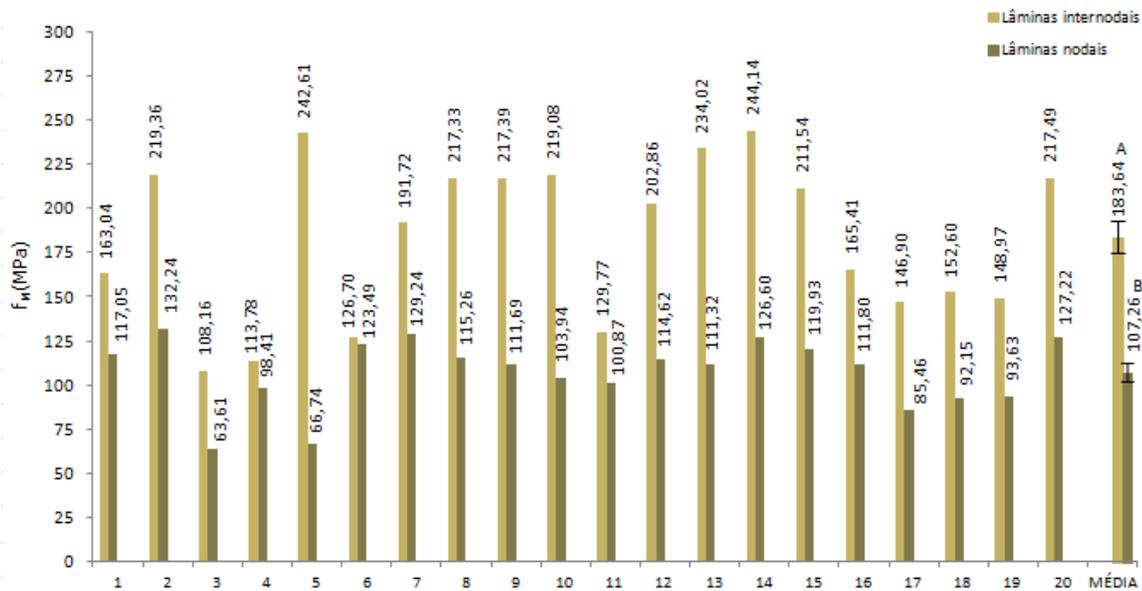


Figura 148 – Módulo de ruptura à flexão ( $f_M$ ) de cada lâmina da amostra e para as repetições do material processado e as respectivas médias

A repetição 5 foi uma das que mostraram elevado desempenho mecânico (242,61 MPa). Nesse corpo de prova foi observado que a causa da ruptura ocorreu devido à tensão de compressão atuante na camada externa. Notou-se, na Figura 149 (a), o referido corpo de prova sendo ensaiado. Na Figura 149 (b), observou-se ruptura por compressão na camada externa da lâmina. E sinais de ruptura por tensão normal, nas bordas do corpo de prova, das Figuras 149 (c) e (d). Na maioria dos casos, os corpos de prova do tipo internodal romperam por tensão normal, diferentemente dos nodais, que romperam especialmente pela tensão de tração nos nós.

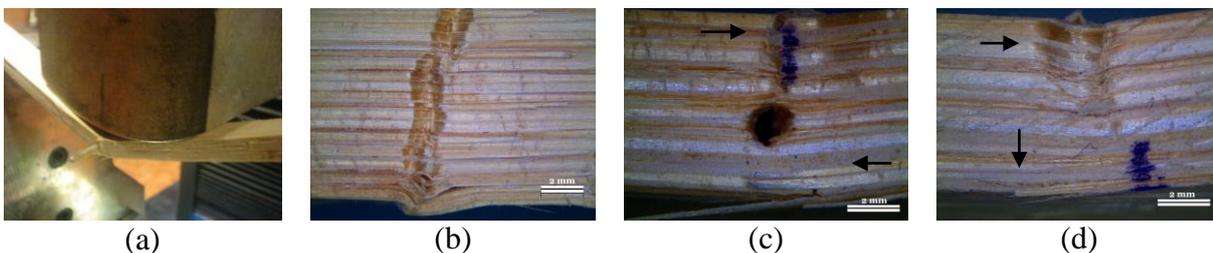


Figura 149 – Ensaio de resistência à flexão estática do corpo de prova da repetição 5 (a) e após a ruptura evidenciando as marcas provocadas pela tensão de compressão na borda superior do corpo de prova (b) e pouca evidência de ruptura por tensão de tração devido ao abaixamento da linha neutra

No tipo internodal a repetição de menor desempenho de resistência à flexão estática no módulo de ruptura, foi a de número 3 (108,16 MPa). A Figura 150 (a) refere-se ao corpo de prova durante o carregamento da carga no ensaio de flexão estática, evidenciando a ruptura na região tracionada. Notou-se que a ruptura ocorreu nas direções transversal e longitudinal às

fibras (Figura 150 (b)). Observou-se, nas bordas laterais do corpo de prova da repetição 3, das Figuras 150 (c) e (d), que apesar de o corpo de prova ter rompido por tensão normal, a ruptura na região tracionada foi evidenciada.

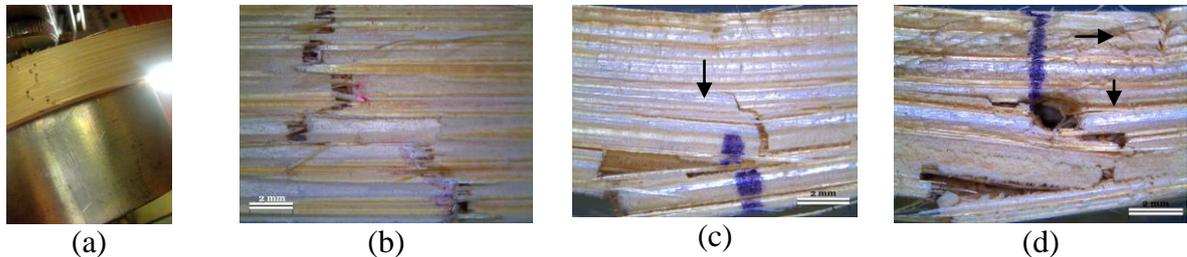


Figura 150 – Ensaio de resistência à flexão do corpo de prova da repetição 3 (a) e após a ruptura fortes marcas provocadas pela tensão de tração na superfície do corpo de prova (b) e nas bordas (c) e (d)

Para as lâminas com nós, os módulos de ruptura das repetições variaram entre 63,61 e 132,24 MPa, sendo a média geral de 107,26 MPa. As lâminas com nó, na maioria das vezes, se romperam por tensão de tração e raramente por tensão normal. No entanto, em alguns casos percebeu-se que o prego inserido para possibilitar a leitura do LVD acabou ocasionando ruptura a partir do centro do corpo de prova, além da ruptura por tensão de tração, como é o caso das repetições 4 e 12. a Figura 151 (a) refere-se ao corpo de prova da repetição 12 no momento do ensaio mecânico. Essa repetição apresentou resistência acima da média. Na Figura 151 (b), observou-se que a ruptura na camada interna do corpo de prova ocorreu praticamente no tecido parenquimático. Na borda lateral do corpo de prova (Figura 151 (c)) notou-se que a ruptura do centro, onde estava localizado o prego, percorreu paralelamente a um feixe de fibras e no tecido parenquimático. Na outra borda lateral, na Figura 151 (d), notaram-se marcas provocadas pela tensão de tração.

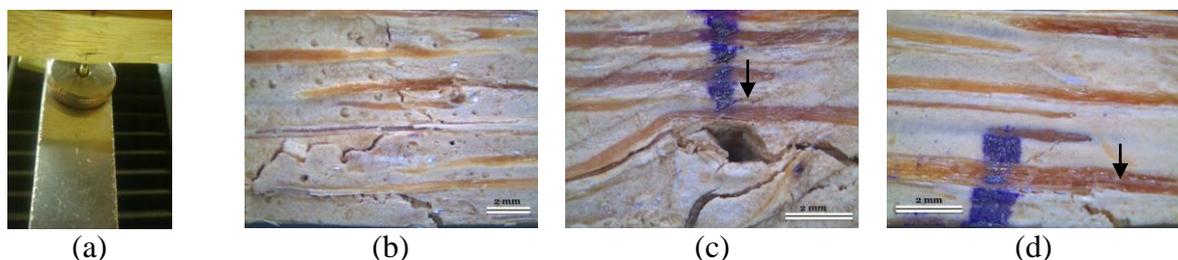


Figura 151 – Ensaio de resistência à flexão do corpo de prova da repetição 12 (a), ruptura na face da camada interna tracionada (b), no centro de uma da borda lateral do corpo de prova (c) e na outra borda, na região tracionada (d)

O módulo de ruptura do corpo de prova com nó da repetição 4 foi de 98,42 MPa, abaixo da média geral. A Figura 152 (a), refere-se ao corpo de prova no momento do ensaio, evidenciando sua ruptura na região tracionada. Na Figura 152 (b), observou-se que a ruptura ocorreu praticamente no tecido parenquimático e tangenciando os feixes de fibras. Notou-se, na lateral onde estava localizado o prego (Figura 152 (c)), que a ruptura do centro do corpo de prova percorreu paralelamente ao feixe de fibras interrompido pelo furo do prego e, perpendicular a eles na região tracionada. Na outra lateral do corpo de prova, observou-se a região rompida por tração (Figura 152 (d)).

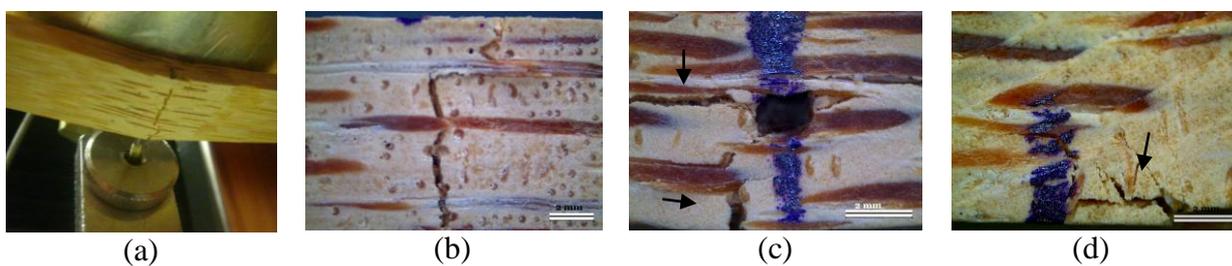


Figura 152 – Ensaio de resistência à flexão do corpo de prova da repetição 4 (a), ruptura na camada interna tracionada (b), no centro de uma da borda lateral do corpo de prova (c) e na região tracionada da outra borda (d)

Na Figura 153 são apresentados os dados dos módulos de elasticidade das repetições nodais e internodais e as suas respectivas médias.

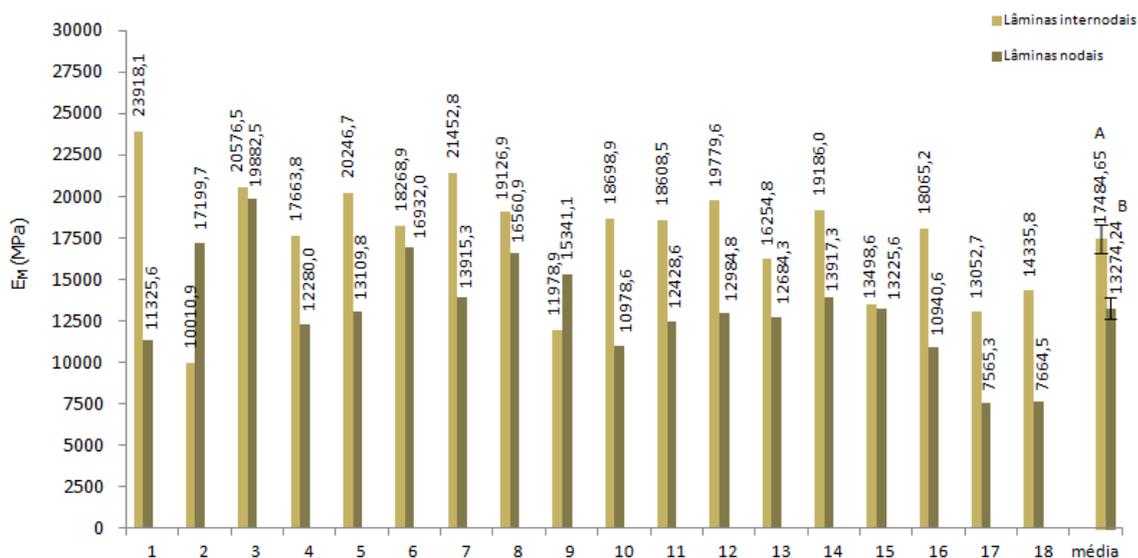


Figura 153 – Módulo de Elasticidade ( $E_M$ ) de cada lâmina para as repetições do material processado e as respectivas médias

Observou-se que, nas repetições internodais, os módulos de elasticidade variaram entre 10.010,9 e 2.3918,1 MPa e que a média foi de 17.484,6 MPa. Para as lâminas com nós, os módulos de elasticidade variaram entre 7.565,3 e 19.882,5 MPa e a média foi de 13.274,2 MPa. O teste de Tukey, considerando o nível de 5% de significância, diagnosticou diferença significativa entre as médias de lâminas nodais e internodais, como representado no gráfico por letras diferentes no topo das respectivas colunas.

A Figura 154 refere-se às rupturas observadas no corpo de prova internodal que apresentou o menor módulo de elasticidade (10.010,9 MPa). Na Figura 154 (a), notou-se que, na camada externa onde a carga foi aplicada, a tensão de compressão provavelmente tenha provocado o cisalhamento do feixe de fibras próximo a uma das laterais do corpo de prova. Na camada interna, na região tracionada, observou-se que a ruptura ocorreu nas direções transversal e longitudinal às fibras (Figura 154 (b)), nas laterais do corpo de prova (Figuras 154 (c) e (d)), foram observadas marcas decorrentes da tensão de compressão ocorrida durante o ensaio de flexão estática em uma seção fora da seção crítica.

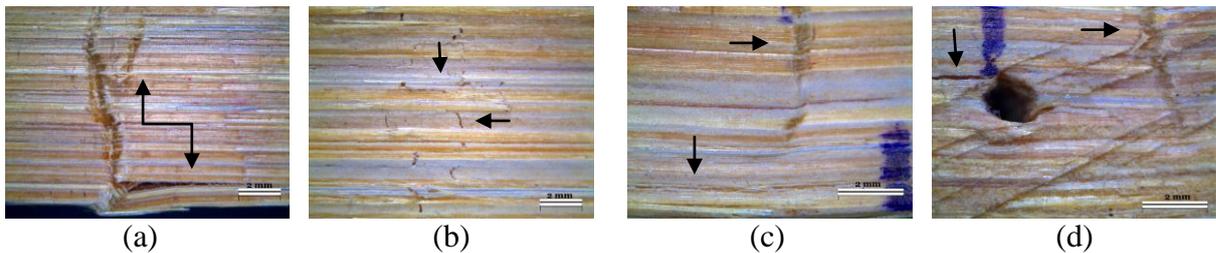


Figura 154 – Corpo de prova da repetição 2 evidenciando as rupturas provocadas pela tensão de compressão na camada externa (a), pela de tração na camada interna (b), ruptura por tensão normal no corpo de prova vista na lateral da ripa (c) e fissura provocada por cisalhamento partindo do furo de fixação do LVDT (d)

A Figura 155 (a) refere-se ao corpo de prova que apresentou o maior módulo de elasticidade no momento do ensaio de flexão estática. Na Figura 155 (b), observou-se que, na região tracionada, a ruptura ocorreu na direção transversal às fibras. Notou-se que, em alguns trechos, essa ruptura foi desviada de feixes de fibras resistentes, os quais não se romperam na linha principal. Na Figura 155 (c), observou-se na borda lateral do corpo de prova, que a ruptura foi provocada pela tensão normal de tração (Figura 155 (d)).

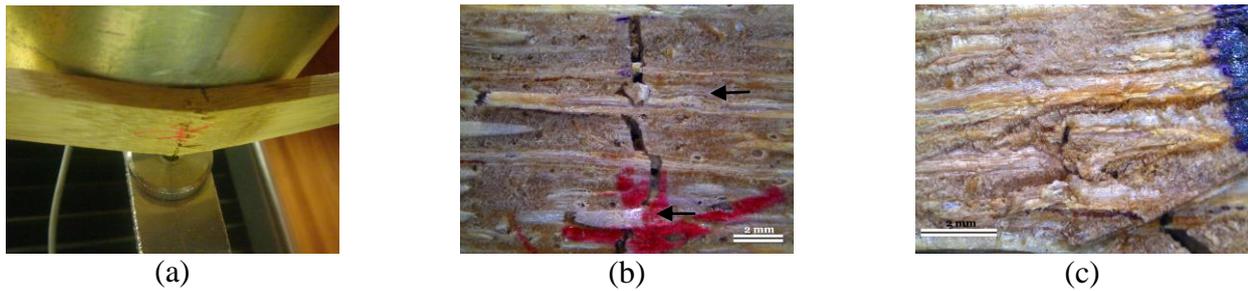


Figura 155 – Ensaio de resistência à flexão estática aplicado ao corpo de prova nodal da repetição 3 (a), ruptura provocada por tensão de tração na superfície da camada interna (b) e na borda lateral (c)

### 4.3.3 Laminado colado de duas lâminas

As possíveis combinações de colagem de acordo com as faces de colagem, ou seja, faces externa contra externa ( $e=e$ ), externa contra interna ( $e=i$ ) e interna contra interna ( $i=i$ ), exercem importante papel no que diz respeito à resistência ao cisalhamento. No entanto, essas combinações de colagem não influenciaram na resistência à flexão e nem no módulo de elasticidade. Portanto, onde é usada a resistência ao cisalhamento puro é importante considerar os efeitos das combinações de colagem das camadas, mas nos usos em que o fator limitante é a resistência à flexão ou o módulo de elasticidade pode-se desconsiderar a influência das combinações de colagem das camadas. Observaram-se, nas repetições, que as rupturas ocorreram de formas diferentes entre as três combinações. Nos corpos de prova internodais, produzido na combinação de colagem  $e=e$ , as rupturas ocorreram na região tracionada e também por tensão normal. Na combinação  $e=i$ , as rupturas ocorreram por tensão normal, ora por tensão de compressão e ora por tensão de tração. Para os corpos de prova internodais com combinação de colagem de faces de contato  $i=i$ , as rupturas ocorreram especialmente por tensão de compressão. Os resultados de resistência à flexão de lâminas maciças nodais e internodais, refletem de certa maneira, os encontrados para as lâminas de bambu coladas, que as rupturas nas camadas externas das lâminas são provocadas por tensão de compressão, e por tração nas camadas internas das lâminas. Uma das possíveis explicações das rupturas por compressão, por tração ou mista nos corpos de prova de BLC é que na combinação  $e=e$ , as camadas internas estão posicionadas de forma a receberem as tensões de compressão e tração, e que acabam por romperem tanto por tensão de compressão, como de tração. Nas lâminas maciças as camadas internas foram posicionadas para suportarem o esforço de tração e por vezes as rupturas ocorreram nas regiões tracionadas; no entanto, não

se observou a influência das camadas internas das lâminas para receberem o esforço de compressão devido ao posicionamento das lâminas maciças no momento do ensaio. Na combinação de colagem  $i=i$ , as camadas externas sofrem as duas tensões simultaneamente. Na lâmina maciça, notou-se que muitas vezes as rupturas ocorreram por tensão de compressão na camada externa da lâmina e tal fato acabou por refletir nos tipos de rupturas encontrados nas repetições de combinação de colagem  $i=i$ , onde ocorreram na maioria das vezes por tensão de compressão. Na combinação de colagem  $i=e$ , as rupturas ocorreram de forma mista, de forma que quando a camada externa da ripa estava posicionada para receber a carga houve ruptura por compressão na maioria das repetições, apesar de também haver ocorrido ruptura por tensão normal e por tração, quando a camada interna estava posicionada para receber a carga, a ruptura ocorreu por compressão. Para todas as combinações de colagem estudadas com corpos de prova do tipo nodal, observou-se que as rupturas ocorreram principalmente nas regiões tracionadas, exatamente como foi observado para as lâminas. A Figura 156 refere-se ao gráfico com os valores de resistência à flexão dos corpos de provas dentro das 6 repetições para cada combinação de colagem.

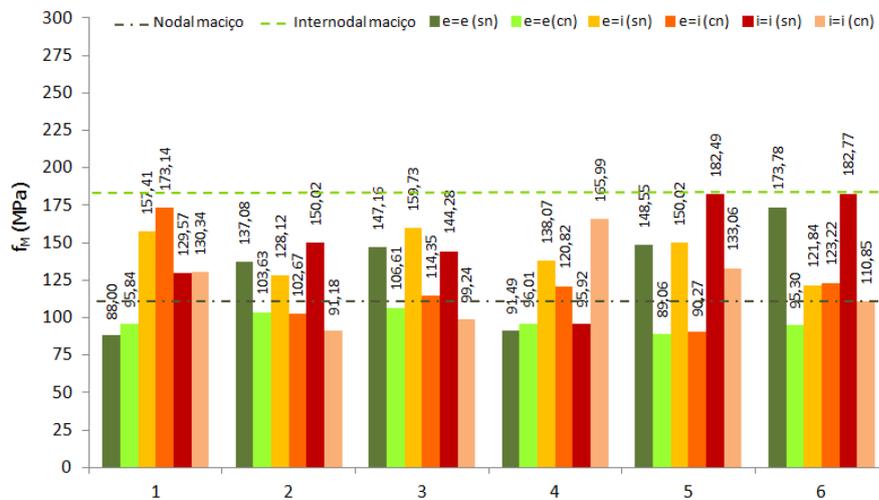


Figura 156 – Módulos de ruptura para as repetições de BLC dentro das combinações de colagem estudadas

A Figura 157 refere-se às médias de resistência à flexão ( $f_M$ ) dentro das combinações de colagem estudadas para corpos de prova nodais e internodais.

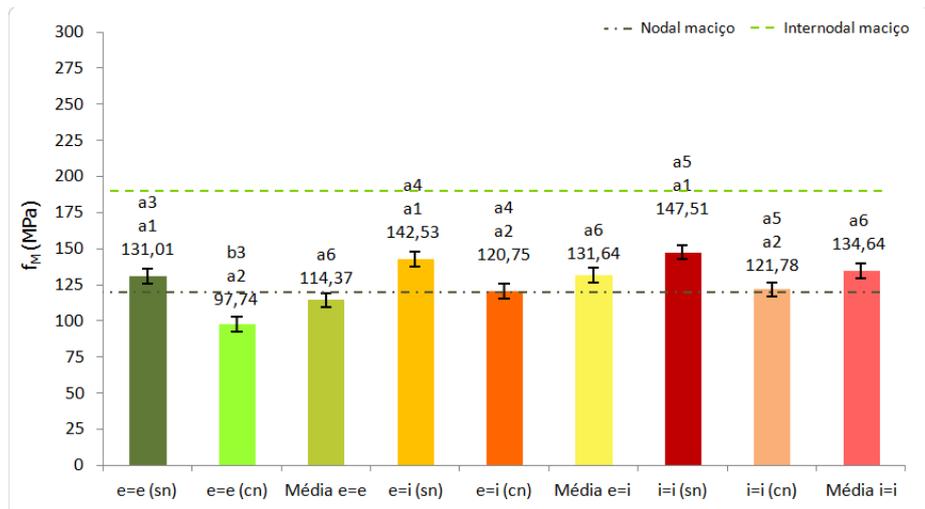


Figura 157 – Médias dos módulos de ruptura para as repetições de BLC dentro das combinações de colagem estudadas

Observou-se que, a combinação de colagem que apresentou média de resistência à flexão superior às demais, foi aquela referente às camadas internas das lâminas (i=i), seguidas das combinações e=i e e=e, respectivamente. No entanto, as três combinações de colagem foram estatisticamente iguais. Este resultado é interessante para o setor industrial, pois a orientação das faces de contato no processo de produção de painéis acarretaria na lentidão do processo de colagem e conseqüentemente, na elevação dos custos finais do produto. Para os corpos de prova nodais não foi observado diferença significativa entre as combinações de colagem. Notou-se que, a combinação de colagem e=e, foi a única que apresentou diferença significativa entre médias nodais e internodais. Na Figura 157, os números correspondem à comparação entre as combinações de colagem, sendo que as letras iguais que antecedem os números significam que não foram encontradas diferenças significativas entre as médias de resistência à flexão. As letras diferentes representam diferenças significativas entre os tratamentos comparados, considerando o nível de 5% de probabilidade.

O número 1 compara as médias de resistência à flexão das três combinações de colagem para a condição internodal. O número 2 compara a média de resistência à flexão das três combinações de colagem para a condição nodal. O número 3 compara as médias de resistência à flexão das repetições nodais e internodais em função da combinação de colagem e=e. O número 4 compara as médias de resistência à flexão das repetições nodais e internodais para a combinação de colagem e=i. O número 5 compara as médias nodais e internodais da combinação de colagem i=i e, o número 6 compara as médias gerais, ou seja, dos corpos de prova nodais e internodais dentro das 3 combinações de colagem estudadas.

Os módulos de elasticidade das combinações de colagem dentro das condições nodais e internodais são observados no gráfico da Figura 158. Nota-se que houve variação dos dados dentro e entre repetições.

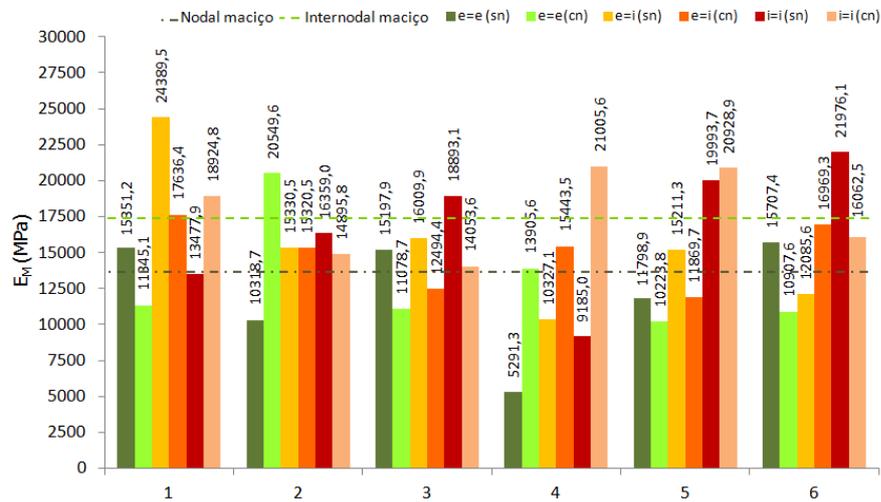


Figura 158 – Módulos de elasticidade para as Repetições de BLC dentro das combinações de colagem estudadas

As combinações de colagem dentro da condição internodal não apresentaram diferenças significativas entre si para o módulo de elasticidade, igualmente ocorreu na condição nodal. Dentro de cada combinação de colagem, as repetições nodais não apresentaram diferenças significativas das repetições internodais, no entanto na média geral de cada uma delas, ou seja, a média que inclui os módulos de elasticidade de todas as repetições nodais e internodais, houve diferenças significativas no módulo de elasticidade para a combinação de colagem e=e em relação às demais combinações. Nos topos das colunas do gráfico da Figura 159 há letras seguidas de números, onde os números iguais correspondem aos tratamentos comparados, as letras iguais que antecedem os números significam que não foram encontradas diferenças significativas entre os tratamentos comparados e, letras diferentes significam diferenças significativas entre tratamentos. O número 1 compara as 3 combinações de colagem dentro da condição internodal; o número 2 compara as 3 combinações de colagem dentro da condição nodal, número 3 corresponde à comparação das condições nodais e internodais dentro da combinação de colagem e=e; o número 4 compara as médias das repetições internodais e nodais dentro da combinação e=i; o número 5 compara as médias dos módulos de elasticidade dentro da combinação de colagem i=i e, o número 6 compara as médias gerais incluindo as resistências dos corpos de prova internodais e nodais dentro de cada combinação de colagem.

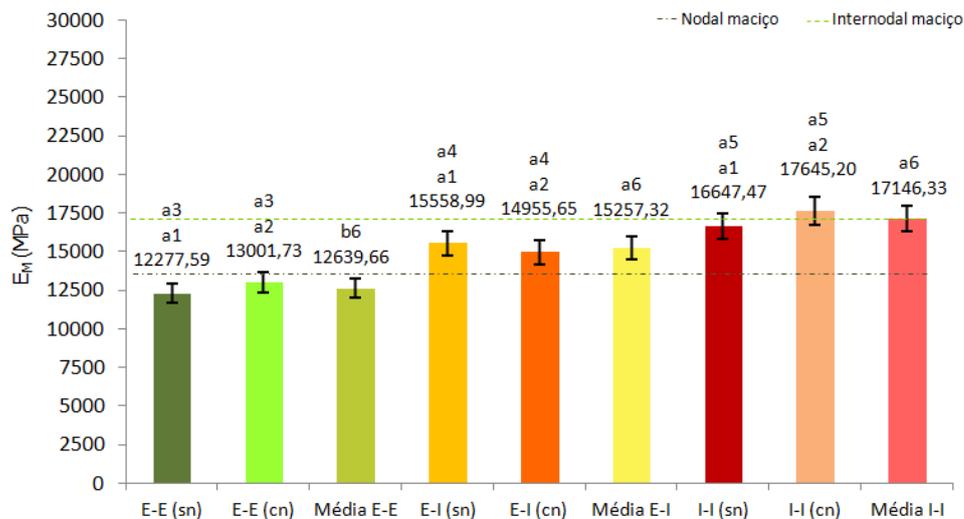


Figura 159 – Média dos módulos de elasticidade para as Repetições de BLC dentro das combinações de colagem estudadas

#### 4.3.4 Ripas e lâminas e laminado

A anatomia da região internodal conduz a ruptura de ripas e lâminas de bambu ocorrer por tração normal, na região dos nós, devido a distribuição desordenada dos elementos anatômicos, há uma grande quantidade de vasos e as fibras curtas o que favorece a ruptura por tração nessa região. Geralmente ripas com nós são significativamente diferentes e apresentam menor resistência à flexão que as ripas internodais, o mesmo ocorre para as lâminas internodais e nodais e para os BLCs sendo que para todos os tipos do material bambu, ou seja, bruto, processado e laminado colado a região dos nós é crítica e de fácil ruptura, sendo significativamente diferente da região internodal. A Figura 160 mostra o gráfico com as médias do módulo de ruptura para os tratamentos estudados, onde entende-se que letras iguais nos topos não apresentam diferenças significativas e, letras diferentes indicam diferenças significativas entre tratamentos. os números ao lado das letras referem-se aos tratamentos que estão sendo comparados.

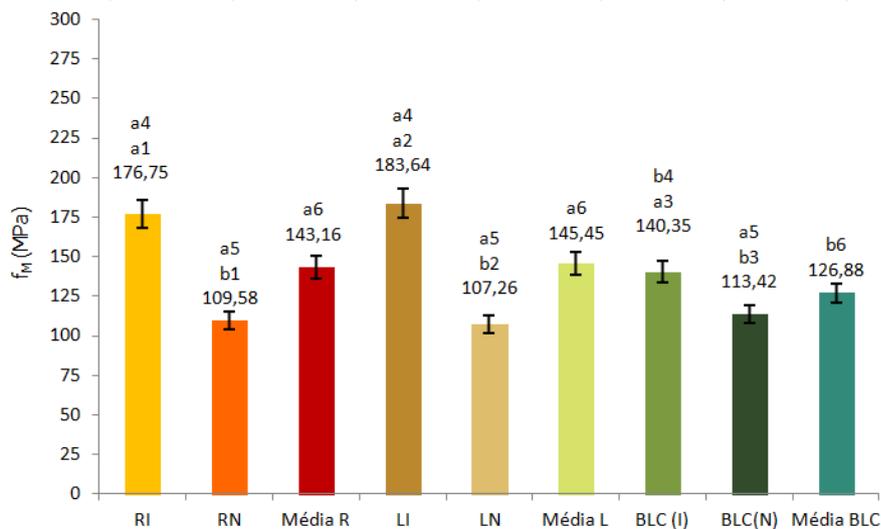


Figura 160 – Módulo de ruptura ( $f_M$ ) para o bambu com sem nó (BSN), com nó (BCN), bruto em forma de ripa (R) e processado em forma de lâmina (L) dentro das condições internodal (I) e nodal (N)

Observa-se no gráfico que dentro da condição internodal o BLC apresenta diferenças significativas em relação a ripas e laminas e, dentro da condição nodal, as ripas, as lâminas e os laminados colados são estatisticamente iguais em relação a resistência à flexão. Na média geral, que inclui repetições com e sem nós de cada tratamento, as ripas e lâminas não apresentam diferenças significativas entre si, mas o bambu laminado apresenta diferenças significativas em relação ao material bruto e processado em forma de lâmina. No gráfico da Figura 160, o número 1 corresponde a comparação de ripas nas condições nodais e internodais, o número 2 compara laminas internodais e laminas nodais, o número 3 compara o BLC internodal (I) com o BLC nodal (N). O número 4 refere-se a comparação de ripas, laminas e laminados colados dentro da condição internodal. O número 5 compara ripas, laminas e laminados colados dentro da condição nodal e, o número 6 compara a média geral de todos os tratamentos.

Os resultados das análises estatísticas dos módulos de elasticidade seguiram a mesma tendência que os encontrados nos módulos de ruptura, ou seja, a média da menor elasticidade foi encontrada para os corpos de prova nodais, tanto para o material bruto como processado em forma de lâmina, mas para o laminado colado as repetições nodais apresentaram elasticidade ligeiramente mais elevada que as internodais. A Figura 161 apresenta o gráfico com as médias do módulo de elasticidade para os tratamentos estudados.

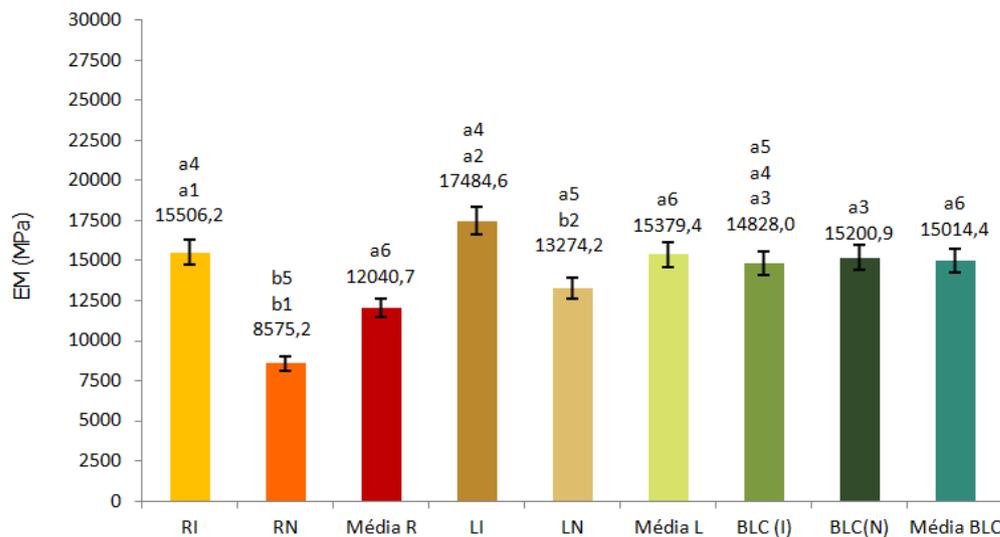


Figura 161 – Módulo de Elasticidade ( $E_M$ ) para o bambu bruto em forma de ripa (R) e processado em forma de lâmina (L) dentro das condições internodal (I) e nodal (N) e uma análise geral dos corpos de prova de bambu sem nó (BSN) e com nó (BCN)

Nota-se no gráfico da Figura 161 que as ripas internodais (RI) apresentam diferenças significativas em relação a Ripas nodais (RN), o mesmo resultado ocorre para o material processado em forma de lâmina, as laminas internodais (LI) são estatisticamente diferentes que as lâminas nodais (LN), observa-se que o laminado colado internodal (BLC (I)) não apresenta diferença significativa em relação ao bambu laminado colado nodal (BLC (N)). Dentro da condição nodal as ripas apresentam diferenças significativas em relação a lâminas e bambu laminado, os quais são estatisticamente iguais. Nas médias gerais de cada tratamento, que incluem repetições nodais e internodais, houveram diferenças significativas da ripa nodal em relação as médias de lâminas e de bambu laminado colado (BLC). No gráfico da Figura 161 o número 1 corresponde a comparação de ripas nas condições nodais e internodais, o número 2 compara laminas internodais com laminas nodais, o número 3 compara o BLC internodal (I) com o BLC nodal (N). O número 4 refere-se a comparação de ripas, lâminas e laminados colados dentro da condição internodal. O número 5 compara ripas, laminas e laminados colados dentro da condição nodal e, o número 6 compara a média geral de todos os tratamentos.

### 4.3.5 Vigas simples

A qualidade da superfície das lâminas que compõem os painéis é de suma importância para a qualidade final das vigas. No presente estudo o processo de transformação de algumas ripas em lâminas ocasionou certos defeitos nos painéis individuais e, conseqüentemente nas vigas simples de 5 ou 3 camadas. Os defeitos mais críticos foram as retiradas dos nós com serra circular, especialmente no lado interno das ripas, onde o processamento mecânico causou diferenças nas espessuras das regiões internodais em relação aos nós (Figuras 162 (a) e (b)), outro defeito observado em algumas lâminas foi o afinamento na espessura da extremidade da lâmina que foi inserida na desgrossadeira. As bordas de algumas lâminas apresentaram arrepio das fibras ocasionado pelo processamento da borda em direção contrária ao sentido das fibras (Figura 162 (d)), este defeito influencia diretamente na ancoragem do adesivo entre lâminas.

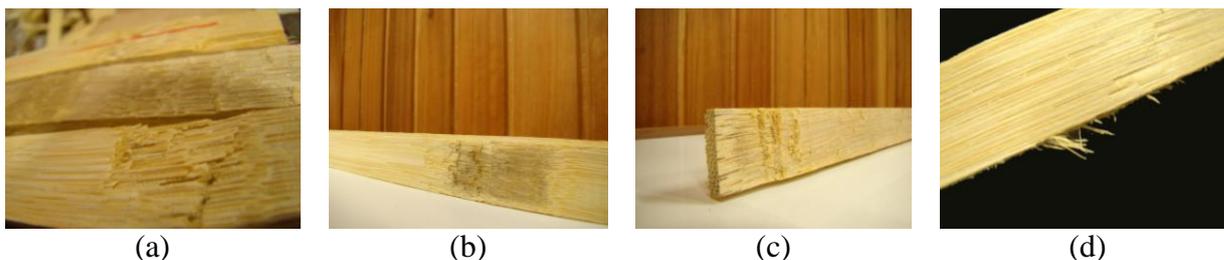


Figura 162 – Defeitos das lâminas ocasionados pelo processamento mecânico (a), próximo à região nodal (b), na extremidade da lâmina (c) e arrepio de fibras na borda da lâmina (d)

Defeitos naturais da própria matéria prima também foram observados, como por exemplo, o empenamento de algumas lâminas (Figura 163 (a)), este empenamento acaba por estar diretamente relacionado com o processo de colagem das bordas das lâminas, pois não mantém contato direto com a lâmina vizinha, no entanto o posicionamento das lâminas dentro da fôrma e travamento da mesma no momento da prensagem corrigiu o empenamento das lâminas, ou seja, o defeito físico, mas não o defeito mecânico ocasionado no processo de transformação de ripas em lâminas (Figura 163 (b)).

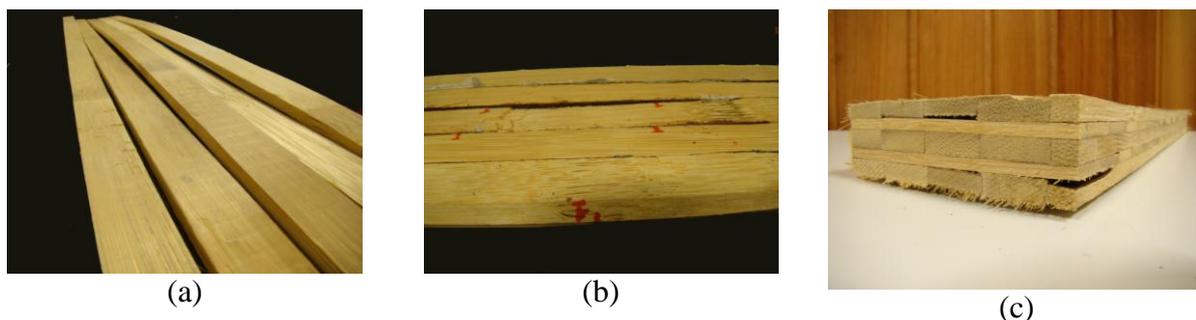


Figura 163 – Defeitos de ordem física das lâminas (a), corrigido pela prensagem do painel individual (b) e na viga produzida (c)

Em alguns painéis individuais notou-se que as primeiras duas lâminas do painel apresentaram sinais de movimentação dentro da fôrma, ou seja, houve acomodação das lâminas durante a aplicação da carga, pois alguns painéis apresentaram as lâminas mencionadas desalinhadas das demais (Figura 164 (c)). Todos os defeitos estão relacionados com a ancoragem do adesivo entre as lâminas e entre as camadas que compõem a viga (Figura 150 (c)), pois os painéis individuais produzidos com lâminas que possuíam defeitos do processamento mecânico ocasionaram na irregularidade das superfícies de alguns painéis, dificultando o contato direto entre painéis individuais, ou seja, entre as camadas da viga no momento da prensagem, o mesmo ocorreu para as vigas produzidas com pelo menos um painel (camada) que tenha sofrido acomodação das lâminas da carga durante o processo de prensagem. Para corrigir os defeitos dos painéis individuais houve o reprocessamento mecânico das superfícies dos painéis individuais acarretando no favorecimento da ancoragem do adesivo entre as camadas devido a maior área de contato entre elas, esse reprocessamento ocasionou na elevação da resistência à flexão e do módulo de elasticidade. Nota-se na Figura 164 que o reprocessamento das superfícies dos painéis individuais de bambu laminado colado  $0^\circ$  ( $PBLC_{0^\circ}$ ) na plaina desengrossadeira e, dos painéis individuais de bambu laminado colado  $0^\circ/90^\circ$  ( $PBLC_{0^\circ/90^\circ}$ ) na lixa amenizou certos defeitos, como por exemplo, o da desigualdade de espessura ao longo dos painéis, observa-se que o  $PBLC_{0^\circ/90^\circ}$  sem reprocessamento da Figura 164 (a) apresenta superfície com espessura irregular e, que após o tratamento de regularização da superfície em lixa (Figura 164 (b)) o defeito foi de certa forma solucionado. A Figura 164 (c) mostra um  $PBLC_{0^\circ}$  sem o reprocessamento mecânico com defeito oriundo da acomodação das lâminas durante o carregamento da carga e, após o reprocessamento da superfície na plaina desengrossadeira (Figura 164 (d)).



Figura 164 – Painéis individuais de  $BLC_{90^\circ}$  sem plainar (a) e plainado (b) e painéis de  $BLC_{0^\circ}$  sem plainar (c) e plainado (d)

Os resultados do ensaio de flexão indicaram que para todos os tratamentos as vigas compostas por painéis aplainados apresentaram melhor desempenho mecânico diferindo significativamente das vigas compostas por painéis não aplainados. O não reprocessamento das superfícies acarreta em falhas no produto final, especialmente no que diz respeito à ancoragem do adesivo entre camadas. A Figura 165 mostra o gráfico com as médias do módulo de ruptura para os tratamentos estudados, onde letras iguais nos tops das colunas não apresentam diferenças significativas e, letras diferentes indicam diferenças significativas entre tratamentos. Os números que seguem as letras referem-se aos tratamentos que estão sendo comparados. De uma forma geral a grande maioria das repetições aplainadas apresentou resistência à flexão elevada quando comparada às repetições não aplainadas, este resultado é decorrente da maior proximidade entre as superfícies das camadas que compõem as vigas, quando os painéis individuais não são direcionados para o reprocessamento de superfícies, estes podem apresentar defeitos oriundos do processamento mecânico que quando são unidos entre si para formar as camadas das vigas transferem seus defeitos para uma escala maior, ou seja, para as vigas, resultando em um produto com baixo módulo de ruptura e elasticidade. Observa-se na Figura 165 que as vigas de bambu laminado colado de 3 camadas produzidas intercalando painéis  $0^\circ$  com painel  $90^\circ$  ( $VBLC_{0^\circ/90^\circ}$  (3)) comparada a vigas de bambu laminado colado de 3 camadas produzidas com painéis  $0^\circ$  ( $VBLC_{0^\circ}$  (3)), ambas na condição aplainada, não apresentaram diferenças significativas (grupo de médias de índice 1). A resistência foi superior para as vigas compostas por painéis  $0^\circ$ , pois nas vigas do tipo  $VBLC_{0^\circ}$  todas as camadas trabalham na flexão, enquanto que nas vigas  $BLC_{0^\circ/90^\circ}$  duas ou três camadas trabalham para contribuir na flexão, em se tratando de uma viga de perfil I, as vigas do tipo  $BLC_{0^\circ/90^\circ}$  apresentam mais vantagem pois contribuem para maior rigidez das peças. Dentro da condição não aplainada, as vigas  $VBLC_{0^\circ/90^\circ}$  e  $VBLC_{0^\circ}$  compostas 3 camadas não apresentaram diferenças significativas entre si (grupo de médias de índice 2). Dentro da condição aplainada para vigas de bambu laminado colado compostas por 5 camadas, as vigas do tipo  $VBLC_{0^\circ/90^\circ}$  (5) não apresentaram diferenças significativas em relação as do tipo

VBLC<sub>0°</sub> (5) (grupo de médias de índice 3). As vigas de bambu laminado colado compostas por 5 camadas, VBLC<sub>0°/90°</sub> (5) e VBLC<sub>0°</sub> (5) também não apresentaram diferenças significativas entre si vigas dentro da condição não aplainada (grupo de médias de índice 4). Na média geral de cada tratamento computou-se os dados de resistência das vigas compostas por 5 e 3 camadas dentro de aplainado e não aplainado, não observou-se diferenças significativas entre VBLC<sub>0°/90°</sub> e VBLC<sub>0°</sub> (grupo de médias de índice 5). Dentro da média geral das vigas de bambu compostas por 3 e 5 camadas, computou-se os dados de resistência das repetições das VBLC<sub>0°/90°</sub> e VBLC<sub>0°</sub> aplainadas e não aplainadas. Observou-se que as vigas dos tipos VBLC<sub>0°/90°</sub> e VBLC<sub>0°</sub> são estatisticamente iguais (grupo de médias de índice 6).

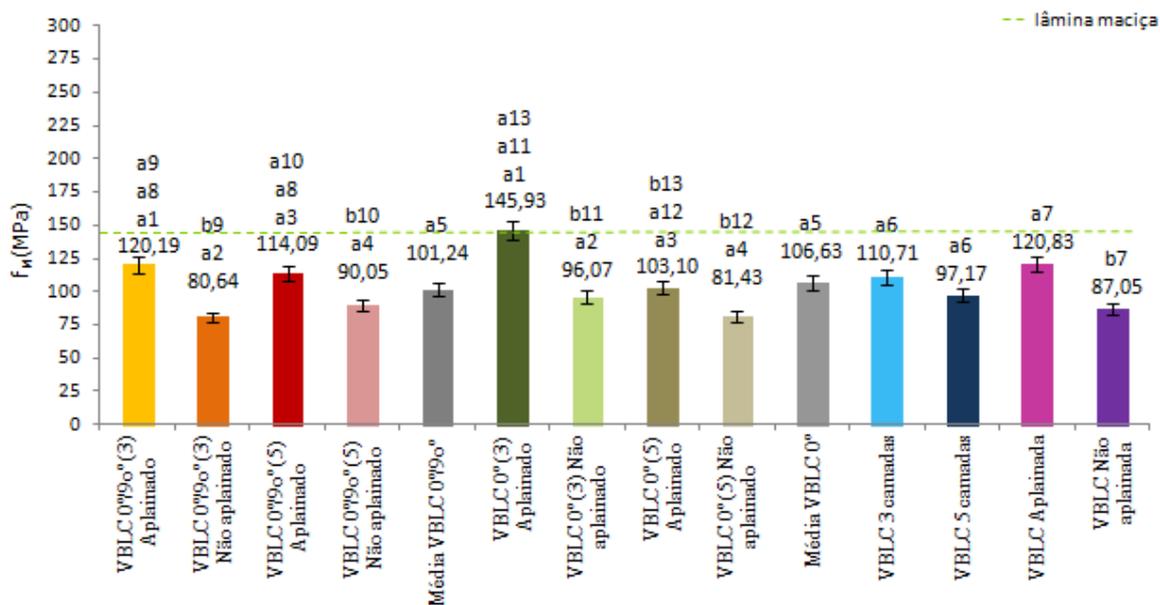


Figura 165 – Médias gerais de resistência à flexão ( $f_M$ ) das VBLC, das VBLC<sub>0°</sub> e VBLC<sub>0°/90°</sub> produzidas com 3 e 5 camadas nas condições plainada e não plainada

Dentro da média geral das vigas de bambu aplainadas e não aplainadas, computou-se os dados de resistência de VBLC<sub>0°/90°</sub> e VBLC<sub>0°</sub> compostos por 3 e cinco camadas. As vigas VBLC<sub>0°/90°</sub> e VBLC<sub>0°</sub> apresentaram diferenças significativas entre si (grupo de médias de índice 7). As vigas que tiveram suas camadas reprocessadas na plaina desengrossadeira e na lixadeira apresentaram melhor resistência. O não reprocessamento dos painéis individuais acarreta em sérios defeitos de colagem, pois as camadas não ficam devidamente próximas umas das outras para resultar em uma colagem eficiente. Dentro da condição aplainada, a resistência das vigas do tipo VBLC<sub>0°/90°</sub> compostas por 3 camadas não apresentou diferença significativa em relação ao mesmo tipo de viga composta por 5 camadas (grupo de médias de índice 8). Comparando a condição aplainada com não aplainada para o tipo de viga VBLC<sub>0°/90°</sub>

composto por 3 camadas encontrou-se diferença significativa (grupo de médias de índice 9). A mesma comparação foi feita para as vigas do tipo VBLC<sub>0°/90°</sub> compostas por 5 camadas. Encontrou-se diferenças significativas, sendo as aplainadas de melhor desempenho mecânico (grupo de médias de índice 10). Para as vigas do tipo VBLC<sub>0</sub> compostas por 3 camadas e por 5 camadas, verificou-se diferenças significativas entre as aplainadas e não aplainadas (grupo de médias de índice 11 e 12 respectivamente). Dentro da condição aplainada para as vigas do tipo VBLC<sub>0°</sub> compostas por 3 e 5 camadas, notou-se que as vigas do tipo VBLC<sub>0°</sub> compostas por 3 camadas são estatisticamente diferentes das vigas compostas por 5 camadas (grupo de médias de índice 13).

De forma geral todos os corpos de prova apresentaram sinais de compressão na região onde a carga foi aplicada (Figura 166 (a)) e a grande maioria rompeu nos nós da região tracionada (Figura 166 (b)), cuja qual é a região mais frágil das lâminas, pois nos nós as fibras são mais curtas, descontínuas que as encontradas nos entrenós (Figura 166 (c)), junto ao fato de nos nós haver abundante presença de vasos transversais, a ruptura é facilitada para ocorrer exatamente na região mencionada.

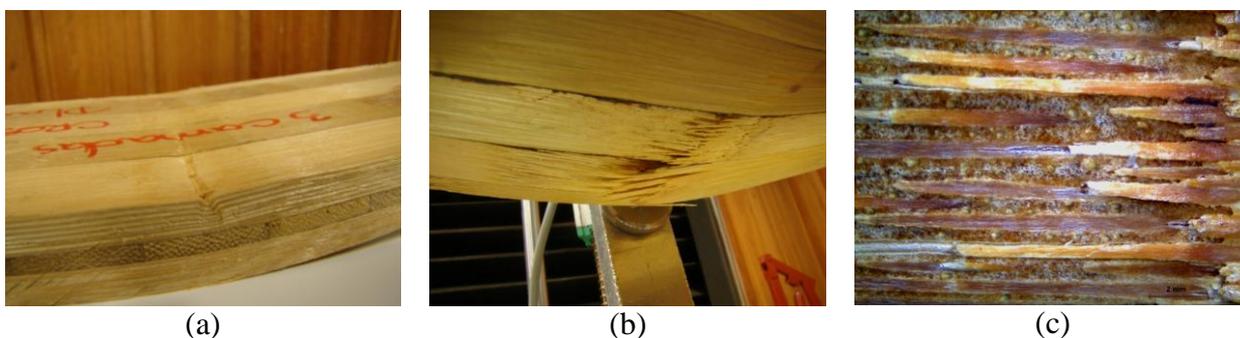


Figura 166 – Sinais de tensão de compressão na superfície da viga (a) ruptura dos nós na região tracionada (b) e a região dos nós observada sob lupa de aumento (c)

Para a grande maioria das vigas de BLC<sub>0°/90°</sub> não aplainadas a ruptura ocorreu por cisalhamento entre camadas (Figura 167 (a)) e em alguns casos dentro da camada referente ao PBLC<sub>90°</sub> (Figura 167 (b) e (c)). Para as vigas de BLC<sub>0°</sub> sem aplainar não houve cisalhamento entre camadas, as rupturas ocorreram por tração nos nós (Figuras 179 (d) – (e) – (f)).

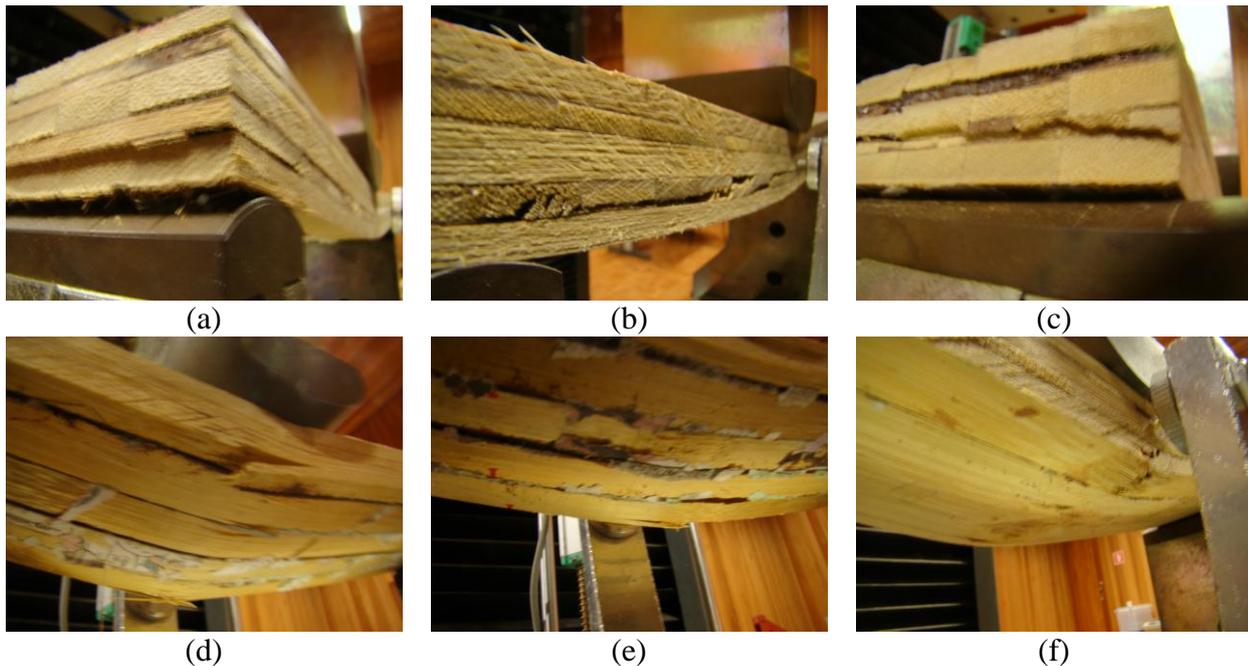


Figura 167 – Cisalhamento entre camadas da Viga BLC  $0^{\circ}/90^{\circ}$  não plainada (a) e dentro do painel PBLC  $90^{\circ}$  (b) e (c) Vigas de BLC  $0^{\circ}$  com ruptura por tração nos nós (d), (e) e (f)

A Figura 168 refere-se aos módulos de elasticidade de todas as repetições, para cada tratamento e as respectivas médias, tendo como referência o módulo de elasticidade da lâmina maciça de bambu representado pela linha tracejada. A comparação entre os dois tipos de vigas de 3 camadas dentro da condição aplainada indicou que não há diferenças significativas entre elas (grupo de médias de índice 1). A comparação entre os dois tipos de vigas de 5 camadas dentro da condição aplainada indicou diferenças significativas entre  $VBLC_{0^{\circ}}$  e  $VBLC_{0^{\circ}/90^{\circ}}$  (grupo de médias de índice 2). Dentro da condição não aplainadas os 2 tipos de vigas de 3 camadas não apresentaram diferenças significativas entre si (grupo de médias de índice 3). Para a condição não aplainada os dois tipos de vigas de 5 camadas, não houve diferença significativa (grupo de médias de índice 4). O tipo de viga  $VBLC_{0^{\circ}/90^{\circ}}$  apresentou melhor elasticidade, provavelmente a adesão entre camadas foi melhor que nas vigas do tipo  $VBLC_{0^{\circ}}$ , pois notou-se que os painéis individuais do tipo  $PBLC_{90^{\circ}}$  apresentaram menos variação de espessura devido ao comprimento curto das lâminas, para os painéis do tipo  $PBLC_{0^{\circ}}$  essa variação foi maior em decorrência dos nós e dos defeitos oriundos do processamento mecânico, no entanto quando os dois tipos de painéis individuais não aplainados foram unidos para produção da viga  $VBLC_{0^{\circ}/90^{\circ}}$  houve maior área de contato entre camadas proporcionado pelas camadas referentes aos painéis  $PBLC_{90^{\circ}}$ . Comparando as condições aplainadas e não aplainada para as vigas do tipo  $VBLC_{0^{\circ}/90^{\circ}}$  de 3 camadas, observou-se elasticidade significativamente maior para as vigas (grupo de médias de índice 5). Para as vigas

VBLC<sub>0°/90°</sub> de 5 camadas, verificou-se os mesmos resultados encontrados para as vigas de 3 camadas, que as vigas produzidas com painéis individuais reprocessados apresentaram diferenças significativas em relação à vigas produzidas por painéis não aplainados (grupo de médias de índice 6).

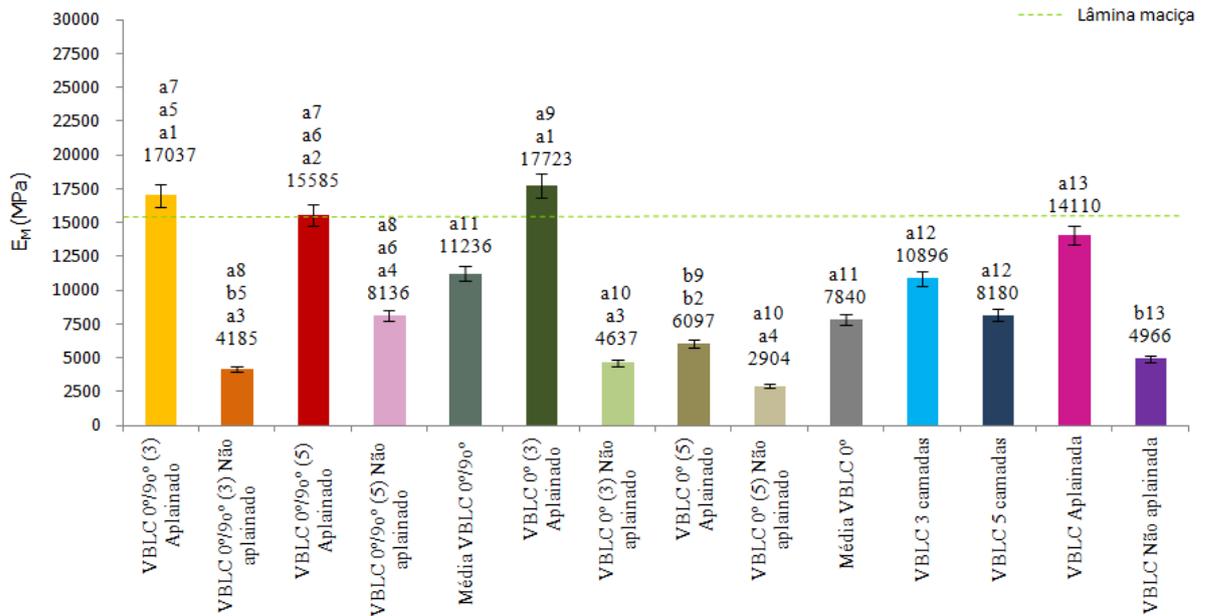


Figura 168 – Médias gerais dos módulos de elasticidade ( $E_M$ ) das VBLC<sub>0°</sub>, VBLC<sub>0°/90°</sub> e do conjunto das VBLC de 3 e 5 camadas nas condições aplainada e não aplainada

Na comparação entre as vigas do tipo VBLC<sub>0°/90°</sub> produzidas com 3 e 5 camadas dentro da condição aplainada, notou-se que não houve diferenças significativas (grupo de médias de índice 7). Para a mesma comparação dentro da condição não aplainada, verificou-se que não diferenças significativas entre as vigas VBLC<sub>0°/90°</sub> compostas por 3 e 5 camadas (grupo de médias de índice 8). Comparando as vigas do tipo VBLC<sub>0°</sub> de 3 e 5 camadas dentro da condição aplainada, notou-se diferença significativa entre as vigas (grupo de médias de índice 9). As vigas de 3 camadas se mostraram mais eficientes em todas as repetições, observou-se que quanto mais se acrescenta camadas nas vigas do tipo VBLC<sub>0°</sub> menor é o módulo de elasticidade e a resistência à flexão. Dentro da condição não aplainada, a comparação entre as vigas do tipo VBLC<sub>0°</sub> produzidas com 3 e 5 camadas, não apresentou diferença significativa (grupo de médias de índice 10). As médias do módulo de cada tipo de viga, que incluem vigas de 5 e 3 camadas aplainadas e não aplainadas, foram comparadas entre si. Estatisticamente as vigas VBLC<sub>0°</sub> e VBLC<sub>0°/90°</sub> não apresentaram diferença significativa (grupo de médias de índice 11). Para as vigas de 3 e 5 camadas não houve diferença significativa (grupo de médias de índice 12). Os 2 tipos de vigas VBLC<sub>0°</sub> e VBLC<sub>0°/90°</sub> de 3 e 5 camadas, foram comparados

dentro das condições aplainada e não aplainada. Observou-se diferença significativa entre vigas (grupo de médias de índice 13). As aplainadas apresentaram melhor desempenho mecânico em relação as não aplainadas, pois as superfícies dos painéis reprocessados apresentaram-se lisas e isentas de ondulações oriundas do processamento mecânico, portanto, proporcionaram melhores condições de adesão e melhor ancoragem do adesivo entre camadas elevando desta forma o módulo de elasticidade, especialmente para as de 3 camadas. O reprocessamento dos painéis é de suma importância para a qualidade do produto final, pois as vigas aplainadas, praticamente triplicaram o módulo de elasticidade quando comparadas com as não aplainadas.

#### 4.3.6 Vigas de perfil I

Os valores de módulo de ruptura obtidos nos ensaios das vigas I à flexão estática estão mostrados na Figura 169 e comparados com os valores da mesma propriedade obtida do material maciço de bambu.

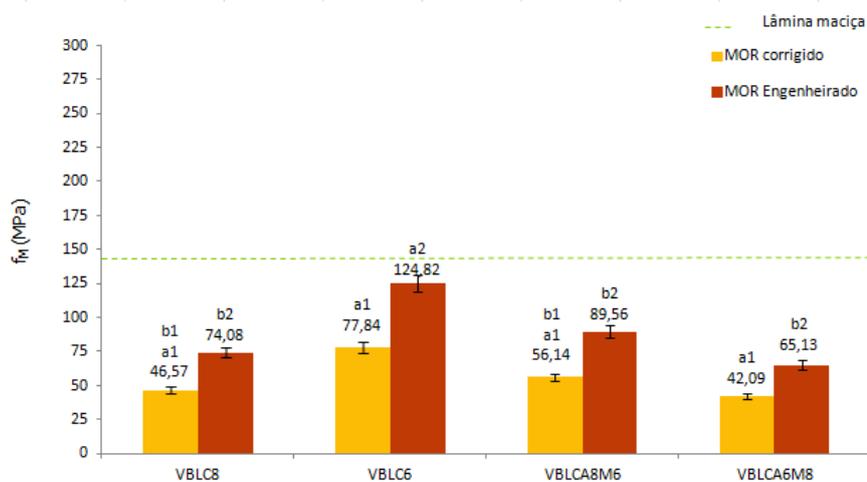


Figura 169 – Módulo de ruptura à flexão ( $f_M$ ) ou MOR de vigas laminadas coladas de perfil I ( $VBL C_{AiMj}$ ) com i e j indicando a espessura da lâmina (em mm) usada na montagem da alma e mesa respectivamente

A Figura 170 refere-se aos valores de módulo de elasticidade obtidos nos ensaios das vigas I à flexão estática, tendo como referência o módulo da lâmina maciça indicado pela linha tracejada.

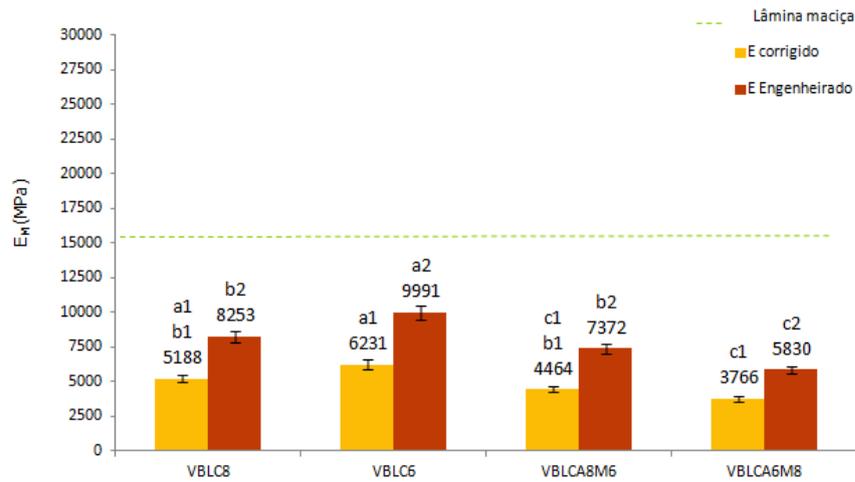


Figura 170 – Módulo de elasticidade à flexão ( $E_{M0}$  ou  $E$ ) de vigas laminadas coladas ( $VBLC_{AiMj}$ ) de seção transversal “I” com  $i$  e  $j$  indicando a espessura da lâmina (em mm) usada na montagem da alma e mesa respectivamente

Os módulos corrigidos foram obtidos pela multiplicação do módulo de ruptura da norma pelo fator de correção ( $I_{fictício}/I_{bruto}$ ) que é a relação entre o momento de inércia de uma seção transversal retangular de referência e o momento de inércia da seção I real. O  $I_{bruto}$  foi calculado com a Equação (7) que significa considerar a alma e as mesas como peças maciças sem laminação (monoblocos) e ligadas entre si por ligações coladas de mesma qualidade mecânica da madeira (Figura 171 (a)).

$$I_{bruto} = \frac{b_1 \times h_1^3}{12} + b_1 \times h_1 \times \left(\frac{b_2}{2} + \frac{h_1}{2}\right)^2 + \frac{b_2 \times h_2^3}{12} + b_2 \times h_2 \times (0)^2 + \frac{b_3 \times h_3^3}{12} + b_3 \times h_3 \times \left(\frac{h_3}{2} + \frac{h_2}{2}\right)^2 \quad (7)$$

Os módulos engenheirados foram igualmente obtidos com o fator de correção ( $I_{fictício}/I_{Eng}$ ) sendo o  $I_{Eng}$  calculado pela Equação (8) com as variáveis da Figura 171(b) desprezando-se as contribuições dos painéis perpendiculares ao eixo da viga.

$$I_{Eng} = b_1 \left[ \frac{h_{1.1}^3}{12} + h_{1.1} \times \left(\frac{h_2}{2} + h_{1.3} + h_{1.2} + \frac{h_{1.1}}{2}\right)^2 + 0 + \frac{h_{1.3}^3}{12} + h_{1.3} \times \left(\frac{h_2}{2} + \frac{h_{1.3}}{2}\right)^2 \right] + 3 \times \frac{b_{2.1} \times h_2^3}{12} + 0 + b_3 \times \left[ \frac{h_{3.1}^3}{12} + h_{3.1} \times \left(\frac{h_2}{2} + h_{3.1} + h_{3.2} + \frac{h_{3.3}}{2}\right)^2 \right] \quad (8)$$

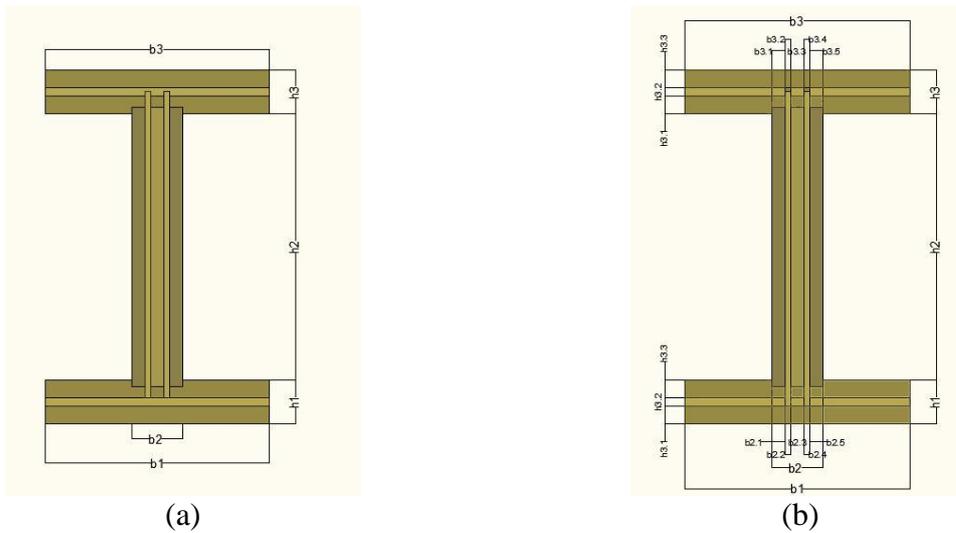


Figura 171 – Seção transversal da viga “I” considerada de alma e mesas maciças (a) e laminadas como foram fabricadas (b)

Os módulos de ruptura à flexão observados na Figura 169 foram aparentemente baixos situando-se aproximadamente na faixa de 30 a 50% do valor da resistência do material lenhoso do bambu. Esses valores, entretanto, não são valores de resistência e sim de tensões solicitantes no final do ensaio porque não houve ruptura das vigas por flexão simples. Predominou instabilidade local da mesa (Figura 172) na região de aplicação da carga e instabilidade global com torção (Figura 173).

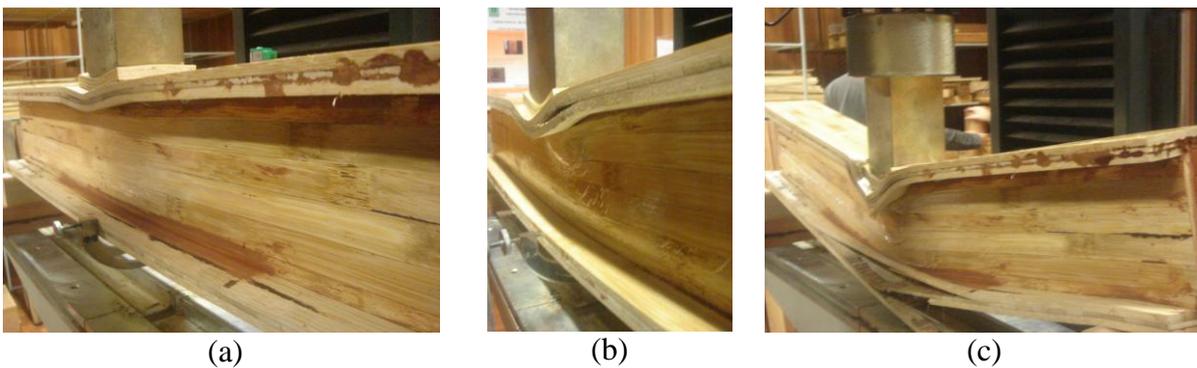


Figura 172 – Instabilidade local da mesa agravada pela concentração de tensões devido à elevada carga aplicada

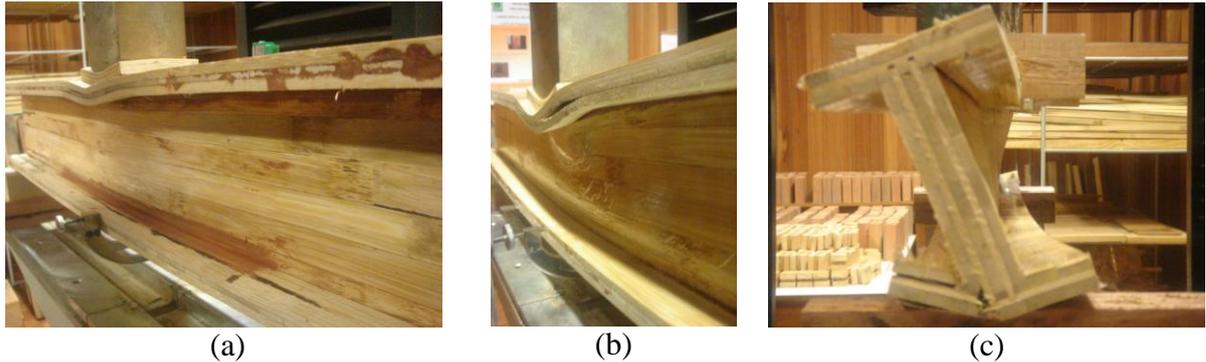


Figura 173 – Instabilidade global com torção disparada pelo esmagamento excessivo da mesa inferior pela reação do apoio

Os módulos de elasticidade não foram prejudicados pela instabilidade porque são calculados com cargas relativamente baixas à capacidade de carga das vigas ensaiadas mas foram prejudicados pelo esmagamento das mesas inferiores pelas reações de apoio. Os deslocamentos consequentes desses esmagamentos foram confundidos como flecha pelo sistema de medição dos deslocamentos verticais do ponto central das vigas.

O esmagamento da mesa inferior ocorreu de forma relativamente fácil pelo baixo módulo de elasticidade e baixo módulo de ruptura do bambu à compressão normal agravado pelo puncionamento da mesa pelos painéis perpendiculares da alma. Foi observado que o esmagamento inicia-se suavemente pela pressão da alma na mesa (Figura 177 (a) e (b)) e prossegue com mais intensidade quando se inicia o puncionamento das duas camadas perpendiculares da alma. Esse puncionamento não é simétrico em relação ao eixo vertical de simetria e então se inicia a torção (Figura 177 (c)) que se agrava quando ocorre ruptura da camada perpendicular da mesa (Figura 177 (d)).

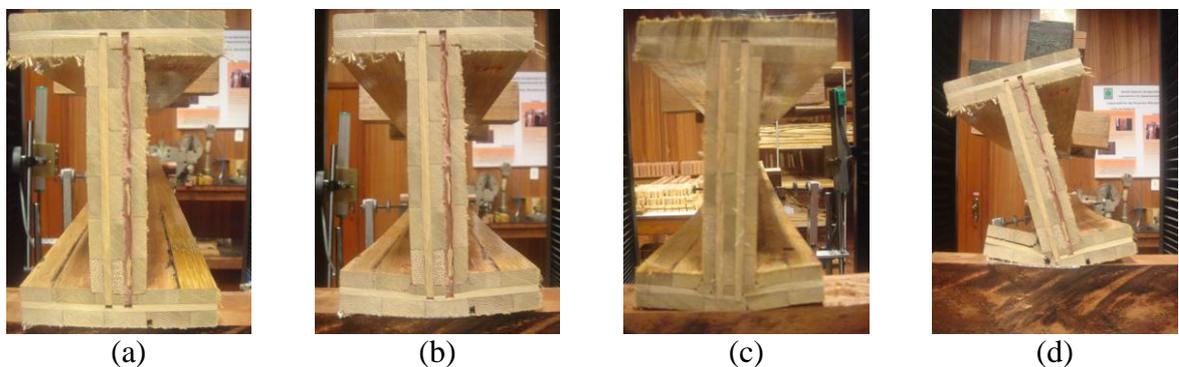


Figura 177 – Início de flexão da mesa inferior por pressão normal da alma (a, b), puncionamento assimétrico pelos painéis perpendiculares da alma (c) e ruptura da camada perpendicular da mesa inferior pelo puncionamento diferenciado por um dos painéis perpendiculares da alma (d)



## 5. CONCLUSÕES

Ripas e lâminas internodais apresentam maior resistência ao cisalhamento radial longitudinal do que as nodais. O arranjo anatômico da região internodal do colmo difere drasticamente daquele da nodal, pois os feixes de fibras na seção longitudinal da região nodal se posicionam tanto axialmente como transversalmente. Esse arranjo prejudica a capacidade de suportar carga quando comparada com a região internodal que é favorecida pela anatomia uniforme dos feixes de fibras.

A ruptura por cisalhamento radial ocorre no tecido parenquimático que é o tecido menos resistente e quando ocorre no tecido fibroso a ruptura ocorre na lamela média contornando fibras e seguindo a grã.

O processamento mecânico de transformação de ripa em lâmina agrega notável melhoria das propriedades mecânicas do bambu, especialmente no material nodal, como consequência de ganho significativo na uniformidade.

A forma de ruptura do material internodal difere drasticamente daquelas dos nodais que geralmente apresentam sinuosidades nas linhas de ruptura devido ao arranjo irregular dos elementos anatômicos no tecido lenhoso.

O desalinhamento dos elementos anatômicos na região nodal favorece a resistência ao cisalhamento tangencial longitudinal.

A resistência ao cisalhamento no plano de cola é muito dependente do processo de colagem das partes do corpo de prova e conseqüentemente do processo de fabricação de vigas laminadas coladas. Numa colagem deficiente o material bambu tem características de material homogêneo embora seja altamente heterogêneo. Numa colagem exitosa a resistência ao cisalhamento aumenta com a pressão de montagem do corpo de prova.

A colagem perde eficiência com o aumento da distância do plano de adesão à periferia do colmo no caso da resistência ao cisalhamento, mas se mantém invariável no caso da flexão.

O nó é extremamente prejudicial nas propriedades da flexão tanto da ripa, que representa o material bruto, quanto da lâmina, que representa o material processado industrialmente. Nas

vigas laminadas coladas o efeito prejudicial do nó é diluído em todo o volume da viga mas é igualmente limitante quando ocorre em pontos críticos da seção crítica. A ruptura por tração no nó ocorre sempre antes da ruptura por compressão. Na ausência de nó, a ruptura acontece aleatoriamente por tração ou compressão, de acordo com o balanço das tensões normais solicitantes com as resistentes.

As propriedades da flexão de vigas laminadas coladas aumentam com o grau de acabamento das faces dos painéis componentes efetuado antes da colagem de composição da viga. Ganha-se qualidade mecânica quando se substitui o desgaste de aplainamento da lâmina pelo desgaste de regularização das superfícies dos painéis a serem coladas. Boa qualidade de superfície favorece a colagem mesmo sob baixa pressão.

## REFERENCIAS

AHMAD, M. **Analysis of Calcutta bamboo for structural composite materials**. 2000. 185p. thesis (Doctor of Philosophy in Wood Science and Forest Products) - Polytechnic Institute and State University, Viginia, 2000

BAHARI, S.A.; AHMAD, M. Failure Behaviour of Semantan Bamboo Strips Loaded in Bending and Shear. **Fracture and Strength of Solids VII, Pts 1 and 2**, v. 462-463, p. 1176-1181, 2011. ISSN 1013-9826. Disponível em: <<Go to ISI>://WOS:000291450700200 >.

BAI, X. **Experimental and numerical evaluations of structural bamboo-based composite materials**. 1996. 163p. Dissertation (MS in Forest Resources) - Clemson University, Clemson, 1996.

COLLETT, B.M. A review of surface and interfacial adhesion in wood science and related fields. **Wood Science and Technology**, New York, v. 6, n. 1, p. 1-42, 1972.

CRUZ, M.L.S. **Caracterização física e mecânica de colmos inteiros do bambu da espécie Phyllostachys áurea: Comportamento à flambagem**. 2002. 14p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil na Área de Estruturas) - Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, 2002

DETHIER, J.; STEFFENS, K.; KRIES, M. **Grow your own house**. Balingen: Vitra Design Museum, 2000. 262p.

GHAVAMI, K. Bamboo as reinforcement in structural concrete elements. **Cement & Concrete Composites**, v. 27, n. 6, p. 637-649, Jul 2005. ISSN 0958-9465. Disponível em: <<Go to ISI>://000229359200002 >.

GONZALEZ SALCEDO, L. **Uso del bambu en el concreto reforzado**. Palmira:Universidad Nacional de Colombia, 2001. p. 44

GRITSCH, C.S.; KLEIST, G.; MURPHY, R.J. Developmental changes in cell wall structure of phloem fibres of the Bamboo *Dendrocalamus asper*. **Annals of Botany**, Oxford, v. 94, n. 4, p. 497-505, 2005.

GROSSER, D.; LIESE, W. On the anatomy of Asian bamboos with special reference to their vascular bundles. **Wood Science and Technology**, Berlin, v. 5, n. 4, p. 290-312, 1971.

GYANSAH, L.; KWOFIE, S. The Effect of Notched Designs on the Performance of Bamboo. **Research Journal of Environmental and Earth Sciences**, Taiwan v. 4, p. 8-15, 2012.

HIDALGO-LÓPEZ, O. **Bamboo the gift of the Gods**. Bogotá: o autor, 2003. 553p.

JANSSEN, J.J.A. **Bamboo in building structures**. 1981. 235p. Thesis (PhD in Building and Planning) - Eindhoven University of Technology, Eindhoven, 1981.

JIANG, S.; ZHANG, Q.; JIANG, S. On Structure, production, and market of bamboo-based panels in China. **Journal of Forestry Research**, Nanjing, v. 12, n. 2, p. 151-156, 2002

JINHE, F. **The Possibilities, Importance and Potential of Bamboos**. Beijing, 2008. palestra...

JÚNIOR, H.C.L.; DIAS, A.A. Vigas mistas de madeira de reflorestamento e bambu laminado colado: análise teórica e experimental. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 5, n. 3, p. 519-524, 2001.

KAI, Z.; XUHE, C. **Potential of Bamboo-based Panels Serving as Prefabricated Construction Materials**. Beijing: International Network for Bamboo and Rattan, 2006.p.38

LEE, A.W.C.; XUESONG, B.; PERALTA, P.N. Selected physical and mechanical properties of giant timber bamboo grown in South Carolina. **Forest Products Journal**, Madison, v. 44, n. 9, p. 40-46, 1994.

LEE, A.W.C.; LIU, Y. Selected physical properties of commercial bamboo flooring. **Forest Products Journal**, Madison, v. 53, n. 6, p. 23-26, 2003

Li, X. **Physical, chemical, and mechanical properties of Bamboo and its utilization potential for fiberboard manufacturing**. 2004. 68p. (Thesis Master of Science) - Louisiana State University, Baton Rouge, 2004.

LIESE, W. Anatomy of bamboo. In: I BAMBOO WORKSHOP HANGZHOU, 1985, Hangzhou. **Proceedings...** Hangzhou, 1985. p.196-208.

\_\_\_\_\_. **The anatomy of bamboo culms**. Beijing: International Network for Bamboo and Rattan, 1998. 208 p. (Technical Report).

LOW, I.M.; CHE, Z.Y; LATELLA, B. A.; SIM, K. S. Mechanical and fracture properties of bamboo. **Key Engineering Materials**, Aedermannsdorf, CH, v. 312, p. 15-20, 2006.

LWIN, K. M.; HAN, Y.Y.; MAUNG, K. W.; MOE, A. Z.; THAN, S. B. M. An investigation on morphology, anatomy and chemical properties of some Myanmar Bamboos. **Proceedings of Myanmar Academy of Agriculture and Forestry**, p. 1-18, 2000.

LYBEER, B.; VANACKER, J.; GOETGHEBEUR, P. Variability in fibre and parenchyma cell walls of temperate and tropical bamboo culms of different ages. **Wood Science and Technology**, New York, v. 40, n. 6, p. 477-492, 2006.

MARRA, A.A. **Technology of wood bonding principles in practice**. New York: Van Nostrand Reinhold. 1992. 453p

MOITA NETO, J.M. **Crônicas Acadêmicas** Teresina: Universidade Federal do Piauí, 2009. 192p.

MOIZÉS, F.A. **Painéis de Bambu, uso e aplicações: uma experiência didática nos cursos de Design em Bauru**. 2007. 116p. Dissertação (Mestrado em Desenho industrial) – Faculdade de Arquitetura, Artes e Comunicação) - Universidade Estadual Paulista, " Júlio de Mesquita Filho", Bauru, 2007.

NOGUEIRA, C.L. **Painel de bambu laminado colado estrutural**. 2008. 94p. Dissertação (Mestrado em Recursos Florestais) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2008

NUGROHO, N.; ANDO, N. Development of structural composite products made from bamboo II: fundamental properties of laminated bamboo lumber. **Journal of Wood Science**, Heidelberg, v. 47, n. 3, p. 237-242, May 2001.

OBATAYA, E.; KITIN, P.; YAMAUCHI, H. Bending characteristics of bamboo (*Phyllostachys pubescens*) with respect to its fiber-foam composite structure. **Wood Science and Technology**, New York, v. 41, n. 5, p. 385-400, Jun 2007.

PARAMESWARAN, N.; LIESE, W. Ultrastructural aspects of bamboo cells. **Cellulose Chemistry and Technology**, Bucharest, RO, v. 14, p. 587-609, 1980.

QISHENG, Z.; SHENXUE, J.; YONGYU, T. **Industrial utilization on bambu**. Beijing: International Network for Bamboo and Rattan, 2001. 207p. (Technical Report).

PEREIRA, M.A.R.; BERALDO, A.L. **Bambu de corpo e alma**. Bauru: Editora Canal 6, 2007. v. 1 240p.

RIVERO, L.A. **Laminado colado e contraplacado de bambu**. 2003. 99p. Dissertação (Mestrado em Construções Rurais e Ambiente) - Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2003.

RITTIRONK, S.; ELNIEIRI, M. Investigating laminated bamboo lumber as an alternate to wood lumber in residential construction in the United States. **Modern Bamboo Structures**, p. 83-96, 2009.

SALAS-DELGADO, E. **Actualidad y futuro de la arquitectura de bambu en Colombia - Simon velez : “símbolo y búsqueda de lo primitivo”**. 2006. 397p. Tese (Doutorado em Arquitetura) - Universidad Politecnica de Cataluña - Escuela Tecnica Superior de Arquitectura de Barcelona, Barcelona, 2006

STANG, A.; HAWTHORNE, C. **The green house: New directions in sustainable architecture**. Princeton Architectural Press, 2005. ISBN 1568984812.

SERNEK, M.; RESNIK, J.; KAMKE, F.A. Penetration of liquid urea-formaldehyde adhesive into beech wood. **Wood and Fiber Science**, Madison, v. 31, n. 1, p. 41-48, 1999.

TEIXEIRA, A.A. **Painéis de bambu para habitações econômicas: Avaliação do desempenho de painéis revestidos com argamassa**. 2006. 177p. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) - Universidade de Brasília, Brasília, 2006

TERRANOVA, A.; LEONE, S; SPIRITO, G.; SPITA, L. **Eco Structures - Forms of sustainable architecture**. Vercelli, Italy: Edizioni White Star. 1: 304 p. 2009.

VRIES, SK. Bamboo construction technology for housing in Bangladesh: opportunities and constraints of applying Latin American bamboo construction technologies for housing in selected rural villages of the Chittagong Hill Tracts, Bangladesh. 2002.

WY.; JIANG, SH.X.; Q.F. LV, ZHANG, Q.SH. Flexural performance of glued laminated bamboo beams. **Advances in Materials Research**, New York, v. 168, n.170, p. 1700-1703, 2011.

YU, H.Q.; JIANG, Z.H.; HSE, C.Y.; SHUPE, T.F. Selected physical and mechanical properties of Moso bamboo (*Phyllostachys pubescens*). **Journal of Tropical Forest Science**, Washington, DC, v. 20, n. 4, p. 258-263, 2008.

YU, X. **Bamboo: structure and culture - Utilizing bamboo in the industrial context with reference to its structural and cultural dimensions**.2007. 178p. Tese (Doutorado em Arte e Design) - Universität Duisburg-Essen, 2007.

ZHENG, W.W.G. **Current status and prospects of new architectural materials from bamboo**. Beijing: Research Institute of Wood Industry, CAF. Disponível em: <[http://www.inbar.int/publication/txt/INBAR\\_Working\\_Paper\\_No47.htm](http://www.inbar.int/publication/txt/INBAR_Working_Paper_No47.htm)>. Acesso em: 4 set. 2009.