

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO CENTRO-OESTE, UNICENTRO-PR

**PRODUÇÃO DE PAINÉIS DE ALTA DENSIDADE E
USO ENERGÉTICO DE BAMBU COM
COPARTICIPAÇÃO DE ERVA-MATE**

TESE DE DOUTORADO

FERNANDO RUSCH

IRATI - PR

2019

FERNANDO RUSCH

**PRODUÇÃO DE PAINÉIS DE ALTA DENSIDADE E USO ENERGÉTICO DE
BAMBU COM COPARTICIPAÇÃO DE ERVA-MATE**

Tese apresentada à Universidade Estadual do Centro-Oeste, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais, na área de concentração em Manejo Sustentável de Recursos Florestais, na área de atuação de Tecnologia de Produtos Florestais e Energia de Biomassa, para a obtenção do Título de Doutor em Ciências Florestais.

Prof. Dr. ÉVERTON HILLIG
Orientador

Prof. Dr. GUILHERME BORDIGNON CEOLIN
Coorientador

Prof. Dr. GABRIEL DE MAGALHÃES MIRANDA
Coorientador

IRATI, PR
2019

Catálogo na Fonte
Biblioteca da UNICENTRO

RUSCH, Fernando.
R951p Produção de painéis de alta densidade e uso energético de bambu com coparticipação de erva-mate / Fernando Rusch. – Irati, PR : [s.n.], 2019.
108f.

Orientador: Prof. Dr. Éverton Hillig

Coorientador: Prof. Dr. Guilherme Bordignon Ceolin

Coorientador: Prof. Dr. Gabriel de Magalhães Miranda

Tese (doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais. Área de concentração em Manejo Sustentável de Recursos Florestais. Área de atuação de Tecnologia de Produtos Florestais e Energia de Biomassa. Universidade Estadual do Centro-Oeste, PR.

1. Engenharia Florestal – tese. 2. Feixes fibrovasculares. 3. Painéis particulados.
4. Propriedades físico-mecânicas. 5. Poder calorífico. I. Hillig, Éverton. II. Ceolin, Guilherme Bordignon. III. Miranda, Gabriel de Magalhães. IV. UNICENTRO. V. Título.

CDD 634.98

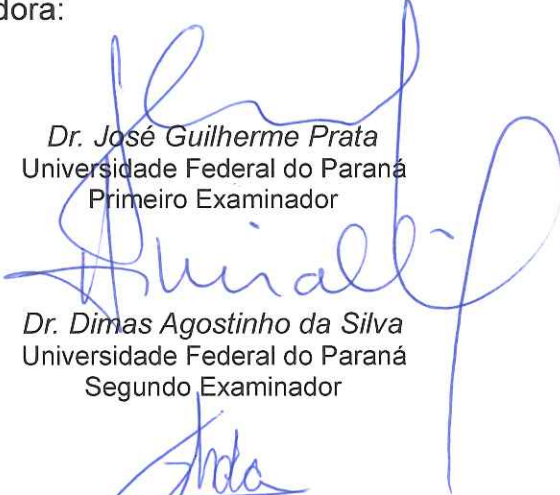
TERMO DE APROVAÇÃO

Defesa de Tese Nº 13

Fernando Rusch


“Produção de painéis de alta densidade e uso energético de bambu com coparticipação de erva-mate”

Tese aprovada em 11/03/2019, como requisito parcial para obtenção do grau de Doutor no Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais, área de concentração em Manejo Sustentável de Recursos Florestais, da Universidade Estadual do Centro-Oeste, pela seguinte Banca Examinadora:




Dr. José Guilherme Prata
Universidade Federal do Paraná
Primeiro Examinador


Dr. Dimas Agostinho da Silva
Universidade Federal do Paraná
Segundo Examinador



Dr. Gabriel de Magalhães Miranda
Universidade Estadual do Centro-Oeste
Terceiro Examinador



Dr. Carlos Magno de Sousa Vidal
Universidade Estadual do Centro-Oeste
Quarto Examinador



Dr. Éverton Hillig
Universidade Estadual do Centro-Oeste
Orientador e Presidente da Banca Examinadora

Irati - PR
2019

RESUMO

O Bambu apresenta elevada capacidade de produzir biomassa, que pode ser utilizada como matéria-prima para diversos usos, contudo, no Brasil a falta de pesquisas é um aspecto limitante para que se aproveite o potencial desta planta. Neste contexto, o objetivo deste estudo foi avaliar a viabilidade técnica do uso de bambu (*Phyllostachys aurea* (Carrière) Riviere et C. Riviere) e coparticipação de erva-mate (*Ilex paraguariensis* A. St. Hil.) na produção de painéis de alta densidade e utilização energética destas biomassas. Os objetivos específicos foram: (i) estudar a anatomia de hastes adultas de diferentes espécies de bambu; (ii) compilar dados das propriedades físico-mecânicas de hastes adultas de diferentes espécies de bambus; (iii) descrever o potencial do uso do bambu para fins energéticos; (iv) avaliar a influência das partículas produzidas a partir de hastes adultas de bambu, de palitos de erva-mate e de madeira de *Pinus taeda* L, nas propriedades físico-mecânicas de painéis de alta densidade; (v) determinar as propriedades energéticas da biomassa de três espécies de bambu e coprodutos de erva-mate (galhos e palitos). Foram definidos procedimentos para obtenção de partículas a partir de cavacos de bambu e palitos de erva-mate, que foram picados e peneirados na granulometria de 8 e 12 *mesh*. Foram produzidos painéis de alta densidade em diferentes proporções de misturas das partículas produzidas e de *Pinus taeda*, conforme o planejamento centróide simplex. A encolagem das partículas foi realizada com resina Melamina-Ureia-Formaldeído (MUF), em misturador rotativo do tipo tambor. Os painéis foram formados manualmente e prensados em prensa hidráulica a 120°C, por 10 minutos, com 60 kgf.cm⁻² de pressão, até a espessura das barras limitadoras de aço de 6 mm. Para avaliação do potencial energético, foi realizada a análise imediata e energética do material obtido de três espécies de bambu, de galhos e de palitos de erva-mate, conforme norma específica. Pelos resultados experimentais dos painéis de alta densidade, verificou-se que a densidade, o teor de umidade, o inchamento (2 e 24 horas), a absorção de água (2 horas), a resistência e a rigidez em flexão estática (MOR e MOE) e a resistência à tração perpendicular foram explicadas pelo modelo cúbico, enquanto a absorção de água (24 horas) e a dureza foram explicadas pelo modelo quadrático. Os melhores resultados das propriedades físicas foram obtidos para as misturas de bambu e *Pinus taeda*, e das propriedades mecânicas para a mistura de bambu, erva-mate e *Pinus taeda*. Concluiu-se em relação à análise energética que existem diferenças estatísticas significativas entre os materiais obtidos das diferentes espécies de bambu e da erva-mate, contudo, os materiais se apresentaram com potencial para uso energético.

Palavras-chave: Feixes fibrovasculares; painéis particulados; propriedades físico-mecânicas; poder calorífico.

ABSTRACT

Bamboo has a high capacity to produce biomass, which can be used as raw material for various uses, however, in Brazil the lack of research is a limiting aspect to take advantage of this plant potential. In this context, the objective of this study was to evaluate the technical feasibility of the bamboo (*Phillostachys aurea* (Carrière) Riviere et C. Riviere) and co-products of mate herb (*Ilex paraguariensis* A. St. Hil.) use in the production of high density panel and energy biomass. The specific objectives were: (i) to study the anatomy of adult stems of bamboo different species; (ii) compile data of the physical-mechanical properties of adult stems of bamboos different species; (iii) describe the potential use of bamboo for energy purposes; (iv) to evaluate the influence of the particles produced from adult bamboo stems, mate herb sticks and *Pinus taeda* L wood on the physico-mechanical properties of high-density panels; (v) determine the energy properties of bamboo species and mate herb co-products (branches and sticks) biomass. Procedures were established to obtain particles from bamboo chips and mate herb sticks, which were chopped and sieved in 8 and 12 mesh granulometry. High density panels were produced in mixtures different proportions of the produced particles and of *Pinus taeda*, according to the simplex centroid experimental design. Adhesive spreading was done with Melamine-Urea-Formaldehyde (MUF) resin in a drum-type rotary mixer. The panels were manually formed and pressed in a hydraulic press at 120 °C, 60 kgf.cm⁻² for 10 minutes, until the 6 mm steel limiting bars. In order to evaluate the energy potential, the immediate and energetic analysis of the material obtained from three bamboo species, pruning branches and sticks of mate herb, according to the specific standards, was carried out. From the experimental results of the high density panels, density, moisture content, swelling (2 and 24 hours), water absorption (2 hours), strength and stiffness in static bending (MOR and MOE) and perpendicular tensile strength are explained by the cubic model, while the water absorption (24 hours) and the hardness are explained by the quadratic model. The best results of the physical properties were observed for bamboo and *Pinus taeda* blends, and of the mechanical properties, for bamboo, mate herb and *Pinus taeda* blend. It was concluded in relation to energy analysis that there are significant statistical differences between the materials obtained from different bamboo species and mate herb, however, the materials presented energy use potential.

Keywords: Vascular bundles; Particleboard; Physical-mechanical properties; Calorific value.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Capítulo 1: ANATOMIA DE HASTES ADULTAS DE BAMBU: UMA REVISÃO

Figura 1. Representação transversal e axial do colmo de duas espécies de bambu.	23
Figura 2. Representação de lâminas com os feixes fibrovasculares.	24
Figura 3. Feixes fibrovasculares da região do nó e do entrenó.	25
Figura 4. Representação de Feixes fibrovasculares.	27
Figura 5. Ilustrações do formato padrão e dos diferentes tipos de Feixes fibrovasculares.	29

Capítulo 3: O POTENCIAL DE USO DO BAMBU PARA FINS ENERGÉTICOS: UMA REVISÃO

Figura 1. Descrição do processo de colheita, transporte e processamento de cavacos de bambu.	54
--	----

Capítulo 4: MODELAGEM DE MISTURAS NA PRODUÇÃO DE PAINÉIS DE ALTA DENSIDADE (HDP) A PARTIR DE BAMBU E COPARTICIPAÇÃO DE ERVA-MATE

Figura 1. Processo de produção dos cavacos de bambu.	70
Figura 2. Processo de picagem.	70
Figura 3. Partículas produzidas em laboratório e comerciais de <i>Pinus taeda</i>	70
Figura 4. Propriedades físicas dos painéis de alta densidade (HDF).	82
Figura 5. Propriedades mecânicas dos painéis de alta densidade (HDF).	84

Capítulo 5: AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES ENERGÉTICAS DE BAMBUS E COPRODUTOS DE ERVA-MATE

Figura 1. Materiais alternativos utilizados no experimento.	92
Figura 2. Teor de umidade (TU) e Densidade básica (Db).	96
Figura 3. Teor de carbono fixo; Teor de voláteis e Teor de cinzas	98
Figura 4. Poder calorífico superior; Poder calorífico inferior e Densidade energética básica.	101

LISTA DE TABELAS

Capítulo 1: ANATOMIA DE HASTES ADULTAS DE BAMBU: UMA REVISÃO

Tabela 1. Classificação dos tipos de feixes vasculares básicos em bambus. 28

Capítulo 2: PROPRIEDADES FÍSICAS E MECÂNICAS DE HASTES ADULTAS DE DIFERENTES ESPÉCIES DE BAMBU: UMA REVISÃO

Tabela 1. Resistência mecânica de algumas espécies de bambu. 44

Capítulo 3: O POTENCIAL DE USO DO BAMBU PARA FINS ENERGÉTICOS: UMA REVISÃO

Tabela 1. Composição e o Poder Calorífico Superior da biomassa de espécies de bambu e *Eucalyptus urograndis*. 56

Tabela 2. Parâmetros do mercado brasileiro de pellets. 57

Tabela 3. Principais parâmetros na produção de pellets. 58

Tabela 4. Composição de briquetes de diferentes espécies de bambu. 58

Tabela 5. Composição do carvão de diferentes espécies de bambu e de *Eucalyptus urograndis*. 59

Tabela 6. Poder calorífico superior do carvão de algumas espécies de bambus e *Eucalyptus*. 60

Tabela 7. Poder Calorífico Superior e rendimento dos carvões vegetais produzidos com bambu. 60

Capítulo 4: MODELAGEM DE MISTURAS NA PRODUÇÃO DE PAINÉIS HDP A PARTIR DE BAMBU E COPARTICIPAÇÃO DE ERVA-MATE

Tabela 1. Propriedades do adesivo (MUF) usado no experimento. 71

Tabela 2. Delineamento experimental. 73

Tabela 3. Densidade aparente das misturas e dos painéis, teor de umidade e razão de compactação dos painéis. 73

Tabela 4. Valores médios das propriedades físicas dos painéis HDP. 75

Tabela 5. Valores médios das propriedades mecânicas dos painéis HDP. 76

Tabela 6. Equações simplificadas para as propriedades físico-mecânicas dos painéis HDP, utilizando-se apenas os coeficientes significativos pelo teste “t”. 78

Tabela 7. Diferença percentual entre o valor real e o estimado nas propriedades físicas. 80

Tabela 8. Diferença percentual entre o valor real e o estimado das propriedades mecânicas. .. 81

Capítulo 5: AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES ENERGÉTICAS DE BAMBUS E COPRODUTOS DE ERVA-MATE

Tabela 1. Distribuição granulométrica (em porcentagem). 95

Tabela 2. Valores médios das propriedades físicas e da análise química imediata. 96

Tabela 3. Determinação dos valores médios da análise energética. 101

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO GERAL	11
Contextualização e justificativa	12
Objetivos	16
Referências bibliográficas.....	16
Capítulo 1: ANATOMIA DE HASTES ADULTAS DE BAMBU: UMA REVISÃO.....	19
Introdução	19
Características morfológicas dos colmos de bambu	21
Características anatômicas dos colmos de bambu.....	23
Padrões para classificação de bambu	26
Alterações estruturais em função da idade.....	31
Considerações finais	32
Referências bibliográficas.....	33
Capítulo 2: PROPRIEDADES FÍSICAS E MECÂNICAS DE HASTES ADULTAS DE DIFERENTES ESPÉCIES DE BAMBU: UMA REVISÃO	36
Introdução	36
Caracterização física e anatômica dos colmos de bambu	38
Propriedades físicas e mecânicas do bambu	41
Considerações finais	46
Referências bibliográficas.....	47
Capítulo 3: O POTENCIAL DE USO DO BAMBU PARA FINS ENERGÉTICOS: UMA REVISÃO.....	52
Introdução	52
Colheita e processamento de bambu	54
Características da biomassa de bambu para fins energéticos	55
Produção de briquetes e pellets de bambu para fins energéticos	56
O uso do bambu para produção de carvão vegetal.....	59
Considerações finais	61
Referências bibliográficas.....	62

Capítulo 4: MODELAGEM DE MISTURAS NA PRODUÇÃO DE PAINÉIS DE ALTA DENSIDADE (HDP) A PARTIR DE BAMBU E COPARTICIPAÇÃO DE ERVA-MATE...	65
Introdução	66
Material e métodos.....	69
Produção de cavacos de bambu.....	69
Produção de partículas de erva-mate e bambu em laboratório.....	70
Confecção dos painéis.....	71
Delineamento experimental e análise estatística.....	72
Resultados e discussão.....	73
Propriedades físicas.....	73
Propriedades mecânicas	75
Modelagem de misturas	77
Conclusões.....	84
Referências bibliográficas.....	85
Capítulo 5: AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES ENERGÉTICAS DE BAMBUS E COPRODUTOS DE ERVA-MATE.....	89
Introdução	90
Material e métodos.....	92
Materiais e local de realização do Experimento.....	92
Caracterização da Biomassa.....	92
Análise química imediata e energética da biomassa	93
Análise dos dados.....	95
Resultados e discussão.....	95
Análise granulométrica	95
Propriedades físicas e análise química imediata	95
Análise do poder calorífico	100
Análise imediata e energética na literatura	103
Conclusão.....	104
Referências bibliográficas.....	104
CONCLUSÃO GERAL	108

INTRODUÇÃO GERAL

A crescente demanda por madeira e a necessidade de reduzir o processo de desmatamento têm estimulado a busca por novas alternativas para suprir este recurso. Uma opção é avaliar a viabilidade técnica de se utilizar o bambu, uma matéria-prima versátil, com diversos usos e aplicações. Isto se deve ao fato de ser um material renovável, de rápido crescimento, possuir boas características físico-mecânicas, baixo custo de manejo e elevada produtividade, além de ser considerada como uma opção de retenção de carbono.

O bambu é um material que pode ser utilizado não somente na sua forma natural, mas também como produto manufaturado. Possui trabalhabilidade e aparência semelhante às de madeiras, além de poder calorífico satisfatório, sendo esses aspectos valorizados pelo mercado. Apesar das extensas áreas de bambuzais existentes no território brasileiro, esse potencial ainda é subutilizado, devido à escassez de estudos nacionais direcionados à avaliação de seu uso para produção de produtos alternativos como, por exemplo, painéis ou biomassa energética. Isso desestimula sua utilização como matéria-prima para estes segmentos, fazendo com que não exista tecnologia nacional voltada a estas temáticas.

A Erva-mate (*Ilex paraguariensis* A. St. Hil.), que apresenta exploração econômica em cerca de 480 municípios dos estados do Paraná, Santa Catarina, Rio Grande do Sul, Mato Grosso do Sul e São Paulo, numa área superior a 110 mil hectares, cultivada em aproximadamente 180 mil propriedades rurais, gerando mais de 700 mil postos de trabalho (EMBRAPA, 2015), surge como outra opção de uso no setor madeireiro, devido a seus coprodutos. No ano de 2014, a produção brasileira atingiu 935 mil toneladas (IBGE, 2016), sendo que, aproximadamente 7% são classificados como resíduo de palitos ao final do processo de beneficiamento nas indústrias ervateiras, ou seja, cerca de 65 mil toneladas anuais, o que pode se tornar uma alternativa de matéria-prima para produção de painéis reconstituídos ou para fins energéticos.

O desconhecimento a respeito da viabilidade técnica da utilização de bambu e de palitos de erva-mate (ramos finos das porções em rebrota da planta) para a produção de partículas visando a fabricação de painéis reconstituídos, aliado à possibilidade de serem utilizados juntamente com madeira, em diferentes formatos e proporções de misturas, para gerar produtos com características físico-mecânicas diferenciadas, constitui-se na justificativa para esse estudo. Da mesma forma, faltam estudos sobre o potencial do bambu e de palitos de erva-mate para fins energéticos. Nesse contexto, pretende-se avaliar o processo de produção e as propriedades físico-mecânicas de painéis de alta densidade, e as propriedades energéticas do bambu com

coparticipação de erva-mate, tendo em vista a hipótese de que estes materiais alternativos podem ser utilizados para essas finalidades.

Contextualização e justificativa

Os bambus, em termos científicos, são classificados como representantes da Família das Gramíneas, Gramineae ou Poaceae, Subfamília Bambusoideae, dividida em duas tribos; a primeira é a Bambuseae, com espécimes de maior porte, xilemáticos, ou seja, com colmos lenhosos e a segunda é a Olyreae com espécimes de menor porte, no caso, herbáceos (PEREIRA; BERALDO, 2007). Segundo Rigueira Jr (2011), bambu é uma gramínea tubular, composta por uma mistura de lignina e celulose, organizada em feixes de fibras, imersa em células parenquimatosas e vasos.

O surgimento do bambu é atribuído ao Período Cretáceo, antes do início da era Terciária, quando surgiu a espécie humana, sendo que os registros históricos mais antigos datam do começo da civilização na Ásia (PEREIRA; BERALDO, 2007). Este desenvolvimento conjunto entre a espécie humana e o bambu explica as inúmeras aplicações e relações com a vida das pessoas, desde matéria-prima para construção de casas, até finalidades diversas, como instrumentos e ferramentas (OLIVEIRA, 2013). A origem da palavra bambu é cercada por mistério para os etimologistas (LÓPEZ, 2003) e a suposição mais aceita é em virtude do estrondo provocado pela explosão de seus colmos quando queimados.

A estimativa do total de espécies de bambus no mundo, no ano de 2004, variava de 1150 até 1600, distribuídas em 60, 90 até 111 gêneros, conforme o autor. Para solucionar esta divergência a Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), responsável pela atividade Agrícola na Organização das Nações Unidas (ONU), financiou a International Network for Bamboo and Rattan (INBAR)¹, para desenvolver o estudo denominado 'Recursos mundiais de bambu', um estudo temático preparado no âmbito da Avaliação Global dos Recursos Florestais 2005. Neste estudo, definiu-se que o número mais aproximado até o ano de 2005, no mundo, era em torno de 1200 espécies catalogadas em 90 gêneros. Destas espécies, 65% são originárias da Ásia, 28% das Américas e 7% da África (LOBOVIKOV et al., 2007).

Os registros científicos atuais enfatizam que existem no mundo, 119 gêneros com 1482 espécies de bambu, classificados em três tribos: (1) Arundinarieae (546 espécies) - bambus temperados, apesar de alguns ocorrerem em altas elevações, nos trópicos; (2) Bambuseae (812

¹Organização intergovernamental que foi criada em 1997 para estimular os benefícios sociais, econômicos e ambientais proporcionados por este vegetal.

espécies) - bambus tropicais, mesmo que alguns ocorram fora dos trópicos; (3) Olyreae (124 espécies) - bambus herbáceos (CLARK et al., 2015; NAYAK e MISHRA, 2016). Esta identificação apenas foi possível em função de resultados filogenéticos (BPG, 2012), contudo, somente cerca de 50 espécies são utilizadas comercialmente. Novas descobertas de espécies e gêneros estão ainda acontecendo (BPG, 2012), devido à ampla área de ocorrência.

As plantas de bambu são encontradas em quase todas as partes do mundo, exceto em regiões de frio muito intenso, como na Europa, embora algumas espécies possam ser facilmente introduzidas em zona temperada. O bambu ocorre entre as latitudes de 51° N no Japão, a 47° S na Argentina, e do nível do mar até 4000 m de altitude, embora a ocorrência de bambu herbáceo nunca exceda a altitude de 1500 m, basicamente em regiões tropicais, subtropicais e temperadas da Ásia, América, África e Oceania, sendo que a maior diversidade é encontrada no Sudeste Asiático e na América do Sul (PANDA, 2011; HAKEEM et al., 2015).

O Brasil apresenta a maior diversidade e o mais alto índice de florestas com endemismo de bambu em toda a América Latina, com 232 espécies nativas, sendo que destas, 137 são endêmicas, os estados com maior diversidade são Minas Gerais, São Paulo, Santa Catarina, Bahia e Paraná, (LONDOÑO, 1999), existem também cerca de 20 espécies introduzidas.

No ano de 2010, a área estimada com bambu era de 31.470.000 ha no mundo, com destaque para a Ásia, com 17.360.000 ha. Apesar da relevância asiática, o Brasil possui a maior área entre todos os países, com 9.300.000 ha, seguido pela China e a Índia, com 5.712.000 e 5.476.000 ha, respectivamente (FAO, 2010).

Com relação as áreas de ocorrência de bambu no Brasil, destacam-se a existência de milhões de hectares de floresta de bambu do gênero *Guadua* spp., com destaque para *G. weberbaueri* no sudoeste da Amazônia, em especial no Estado do Acre (BERALDO; PEREIRA, 2007); os plantios comerciais de mais de 30 mil hectares de *Bambusa vulgaris* no Nordeste, principalmente no Maranhão, Pernambuco e Bahia (GUARNETTI; COELHO, 2014), além de plantios experimentais do gênero *Dendocalamus* spp. em instituições de ensino superior do Estado de Goiás, na região Centro-Oeste (LIMA et al., 2016).

Para Chaowana (2013), a área total ocupada por bambus no mundo é de aproximadamente 36 milhões de hectares, o que representa cerca de 3% da área total de florestas. Na América Latina, os bambus ocupam mais de 10 milhões de hectares, ou 28% da área total de bambus, no mundo. Ocorrem 20 gêneros com mais de 400 espécies, contudo, em menor número que na Ásia e em maior número do que na África (LONDOÑO, 2001;

LOBOVIKOV et al., 2007). Dentre essas, a mais conhecida é *Guadua* spp., caracterizada por colmo de grande dimensão, sendo muito utilizada em construções.

Os bambus possuem excelentes propriedades mecânicas, sendo que, as de maior interesse no campo da Engenharia Florestal são: resistência à tração perpendicular, resistência à compressão (forças sempre paralelas às fibras), dureza e a resistência a variação dimensional. Todo seu processo de crescimento ocorre no primeiro ano e a partir de então, tem início a fase de maturação, que é atingida geralmente entre o terceiro e quarto anos. Contudo, bambus de pouca idade (imaturos) possuem baixas taxas de lignina e grande quantidade de celulose e amido, que são fatores que diminuem sua resistência e durabilidade.

Quando bem conduzido, o bambuzal inicia as condições ideais para produção em escala, de indivíduos de grandes diâmetros e características satisfatórias do material, entre o sexto e sétimo anos, evoluindo até os treze anos, para então se estabilizar. Para Oliveira (2013), os fatores que influenciam na resistência do bambu são diretamente ligados à espécie do indivíduo, aos tipos de solo e clima, ao teor de umidade e à idade em que os colmos foram colhidos.

O volume de biomassa produzida por algumas espécies de bambu é semelhante ao produzido por certas espécies arbóreas utilizadas em reflorestamento (RIGUEIRA JR., 2011). A maioria das espécies de bambu possui crescimento rápido, isso em comparação a espécies arbóreas com semelhantes características de resistência e durabilidade (OLIVEIRA, 2013). A principal vantagem do bambu é poder ser colhido a partir do terceiro ano, já maduro, com alta resistência mecânica e estrutural, além de ter a extração sustentável e anual, por período superior a até 100 anos.

A possibilidade de colheita anual do bambu, mantendo-se os colmos mais jovens, evita que se modifique o meio ambiente, tanto que nem se percebe que foi efetuada a colheita no local (PEREIRA; BERALDO, 2007), evitando danos ambientais, como por exemplo, a erosão. No Brasil, ainda não se aproveita a plenitude do potencial desta gramínea, isto em virtude da errônea relação com obras temporárias. Por esta razão, muitas vezes, o bambu é considerado como um material não durável e pouco confiável, reduzindo o seu interesse científico e tecnológico (MANHÃES, 2008; OLIVEIRA, 2013).

Este desconhecimento a respeito de suas potencialidades é um dos fatores responsáveis pelo círculo vicioso que provoca sua reduzida utilização. Apesar de ser conhecido milenarmente e até fazer parte da cultura de diferentes povos, a indústria de transformação do bambu começou seu desenvolvimento nas décadas 50 e 60 no continente asiático, principalmente na Índia, China e Japão, se expandindo internacionalmente somente

nas últimas décadas, especialmente devido ao aumento no preço da madeira, resultante de sua escassez (QISHENG, 2003).

Nos últimos anos, constata-se o aprimoramento do processo de ‘engenhieramento’ do bambu, que são técnicas que o utilizam nas formas: achatada, de ripas, taliscas, lâminas, tiras, fibras, feixes, partículas, entre outros materiais, para o desenvolvimento de vigas estruturais e painéis de revestimento, muitas vezes utilizando equipamentos da indústria de processamento de madeira (LIU et al., 2016).

A produção estimada de pisos de bambu na China, no ano de 2004, foi de 17,5 milhões de m², sendo 65% exportados. Em 2012, nos principais países produtores o mercado doméstico foi estimado em US\$ 34,2 bilhões (PHIMMACHANH et al., 2015). Para este autor, o aumento da produção tem respaldo no plano nacional de desenvolvimento do bambu, da Administração Florestal da China (2013-2020), que estima o valor total de US\$ 48 bilhões na produção de suas florestas de bambu, no ano de 2020.

Conforme exposto, existe um imenso mercado de pisos de bambu, tanto que a China possui mais de 100 fábricas de pisos, exportando para os EUA, Europa, Japão e diversos países, incluindo o Brasil (BARELLI et al., 2008). Isto, se deve ao fato de tanto o mercado nacional como internacional valorizarem matérias-primas ecologicamente condizentes com o processo de desenvolvimento sustentável, justificando este estudo, que busca avaliar a viabilidade de aproveitamento do potencial existente para a produção de diferentes tipos de painéis a partir da utilização de multi misturas.

Além do potencial verificado em relação ao bambu, o resíduo gerado durante o processo de beneficiamento da erva-mate *in natura*, que prioritariamente é utilizado para geração de energia, por meio da queima em caldeiras ou como cobertura morta para o solo dos ervais, muitas vezes, gerando danos ambientais devido ao seu significativo volume, pode representar uma alternativa complementar para a produção de painéis de partículas produzidas à base de madeira. Segundo o comunicado técnico 214 da Embrapa Florestas, “o resíduo de palitos de erva-mate apresentou potencial para utilização na produção de painéis reconstituídos” (GUIOTOKU et al., 2008, p. 5). Para tanto, torna-se necessário desenvolver pesquisas para aprimorar a aplicação tecnológica deste resíduo, agregando valor aos subprodutos obtidos e ampliando o mercado para esta matéria-prima.

Objetivos

Objetivo geral

Avaliar a viabilidade técnica da produção de painéis de alta densidade, e do uso energético, de bambu com coparticipação de erva-mate.

Objetivos específicos

- Descrever os aspectos anatômicos, as propriedades físicas, mecânicas e energéticas de diferentes espécies de bambu;
- Produzir partículas de uma espécie de bambu e dos palitos de erva-mate obtidos como coprodutos das indústrias;
- Confeccionar e avaliar as propriedades físico-mecânicas de painéis de partículas de alta densidade, puros e com misturas de bambu, palitos de erva-mate e madeira de *Pinus taeda*;
- Analisar a viabilidade energética de diferentes espécies de bambu e coprodutos obtidos da erva-mate.

Além desta introdução geral, contextualização, justificativa e objetivos, a presente tese se apresenta em cinco capítulos e as conclusões finais. Os capítulos 1, 2 e 3 tratam de revisão de literatura a respeito da anatomia e das propriedades físicas, mecânicas e energéticas de diferentes espécies de bambu. O capítulo 4 descreve e discute os resultados obtidos num experimento onde foram avaliadas as propriedades físicas e mecânicas de painéis de alta densidade, a partir de uma modelagem de misturas envolvendo partículas de bambu, erva-mate e pinus. O capítulo 5 trata de uma análise química imediata e energética de diferentes espécies de bambu e coprodutos de erva-mate.

Agradecimentos

O presente trabalho foi realizado com o apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de financiamento 001.

Referências bibliográficas

BARELLI, B. G. P.; PEREIRA, M. A. dos R.; LANDIM, P. da C. A Tecnologia na confecção de protótipos em Bambu Laminado Colado desenvolvida na UNESP-BAURU. **Design, arte e tecnologia**. São Paulo, Universidade Anhembi Morumbi, PUC-Rio, UNESP-BAURU, 2008. Disponível em: <<http://portal.anhembi.br/sbds/pdf/2.pdf>>. Acesso em: 28/06/2015.

Bamboo Phylogeny Group (BPG). An updated tribal and subtribal classification of the bamboos (Poaceae: Bambusoideae). **Bamboo Science & Culture**, v. 24, n. 1, p. 1-10, 2012.

PEREIRA, M. R.; BERALDO, A. L. **Bambu de corpo e alma**. Bauru, SP: Canal6, 2007. e-Book. Disponível em: <http://www.canal6.com.br/ed/wp-content/download/Trecho_inicial_Bambu.pdf>. Acesso em: 16/07/2015.

CHAOWANA, P. Bamboo: An Alternative Raw Material for Wood and Wood-Based. **Journal of Materials Science Research**, Thailand, v. 2, n. 2, p. 90-102, 2013. Disponível em: <<http://www.ccsenet.org/journal/index.php/jmsr/article/view/25691/15870>>. Acesso em: 25/01/2016.

CLARK, L. G.; LONDONO, X.; RUIZ-SANCHEZ, E. Bamboo taxonomy and habitat. (Chapter 1), p. 1 - 30. In: LIESE, W.; KÖHL, M. (eds.), **Tropical Forestry, Bamboo: the plant and its uses**, Springer International Publishing, Switzerland, 2015. DOI 10.1007/978-3-319-14133-6_3

EMBRAPA. EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Sistema de Produção da Erva Mate**. Soluções tecnológicas. Embrapa Florestas, Colombo, PR, 2015. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/busca-de-solucoes-tecnologicas/-/produto-servico/2093/sistema-de-producao-de-erva-mate>>. Acesso em 16 de nov. 2017.

FAO. Global Forest Resources Assessment 2010. FAO FORESTRY PAPER 163. **Food and Agriculture Organization of the United Nations**, Rome, Italy, 2010. 378p.

GUARNETTI, R. L. & COELHO, S. T. Cogeração de eletricidade utilizando bambu no Brasil: aspectos técnicos, econômicos e ambientais. **Jornal Biomassa BR**, v. 3, n. 14, p.3-8, 2014.

GUIOTOKU, M.; LAZARIS, V.; DALLAGO, R. M.; MAGALHÃES, W. L. E. Utilização de Palitos de Erva-Mate na Produção de Painéis de Aglomerado. Comunicado Técnico 214. **Embrapa Florestas**. Colombo, PR, Dezembro, 2008. 6 p.

HAKEEM, K. R. IBRAHIM, S.; IBRAHIM, F. H.; TOMBULOGLU, H. Bamboo biomass: various studies and potential applications for value-added products, p. 231-244. In: HAKEEM, K. R.; JAWAID, M.; ALOTHMAN, O. Y. (Eds.), **Agricultural biomass based potential materials**. Springer International Publishing, Switzerland, 2015.

IBGE. INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Produção Agrícola Municipal (PAM)**. Rio de Janeiro, 2016a. Disponível em: <<http://www.sidra.ibge.gov.br/bda/tabela/listab1.asp?c=1613&z=p&o=29>>. Acesso em: 19/11/2017.

IBGE. INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Produção Agrícola Municipal (PAM)**. Rio de Janeiro, 2016b. Disponível em: <<http://www.sidra.ibge.gov.br/bda/tabela/listab1.asp?c=289&z=p&o=30>>. Acesso em: 19/11/2017.

LIMA, N. L.; VENTUROLI, F.; FERREIRA, G. A. Crescimento inicial em altura de três espécies de bambu, em Goiás. **Revista Tree Dimensional**, v. 1, n. 2, p. 34-38, 2016. Doi: 10.18677/TreeDimensional_2016_010

LIU, X.; SMITH, G. D.; JIANG, Z.; BOCK, M. C. D.; BOECK, F.; FRITH, O.; GATÓO, A.; LIU, K.; MULLIGAN, H.; SEMPLE, K. E.; SHARMA, B.; RAMAGE, M. Engineered bamboo nomenclature. **BioResources**, v. 11, n. 1, p. 1141-1161, 2016. Disponível em: <http://ojs.cnr.ncsu.edu/index.php/BioRes/article/view/BioRes_11_1_1141_Liu_Nomenclature_Engineered_Bamboo/4078>. Acesso em 19 de mai 2017.

LOBOVIKOV, M.; PAUDEL, S.; PIAZZA, M.; REN, H.; WU, J. World bamboo resources: A thematic study prepared in the framework of the Global Forest Resources Assessment 2005. **INBAR/FAO**, Rome, 2007. e-Book. Disponível em: <<http://www.fao.org/3/a-a1243e.pdf>>. Acesso em: 02/09/2015.

LONDOÑO, X. Evaluation of Bamboo Resources in Latin America. **International Network for Bamboo and Rattan**, Cali, Colômbia, 1999. 29p. Disponível em: <http://www.inbar.int/sites/default/files/resources/inbar_working_paper_no35.pdf>. Acesso em: 25/01/2016.

LONDOÑO, X. **Evaluation of bamboo resources in Latin America**. Summary of the final report of Project 96-8300-01-4. INBAR. Beijing, 2001. 30p.

LÓPEZ, O. H. Bamboo, The Gift Of The Gods. Bogota – Colômbia, 2003. 553p.

MANHÃES, A. P. **Caracterização da cadeia produtiva do bambu no brasil**: abordagem preliminar. 39 f. Trabalho de Graduação (Bacharelado em Engenharia Florestal). Instituto de Florestas, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, 2008.

NAYAK, L.; MISHRA, S. P. Prospect of bamboo as a renewable textile fiber, historical overview, labeling, controversies and regulation. **Fashion and Textiles** (Springer Open Journal) 3:2, 2016, 23 p. DOI: 10.1186/s40691-015-0054-5

OLIVEIRA, L. F. A. de. **Conhecendo bambus e suas potencialidades para uso na construção civil**. Trabalho de Pós-Graduação (Especialista em Construção Civil), Departamento de Engenharia de Materiais e Construção, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2013. 90 f.

PANDA, H. **Bamboo plantation and utilization handbook**. Delhi: Asia Pacific Business Press, 2011. 568 p.

PEREIRA, M. R.; BERALDO, A. L. **Bambu de corpo e alma**. Bauru, SP: Canal6, 2007. e-Book. Disponível em: <http://www.canal6.com.br/ed/wp-content/download/Trecho_inicial_Bambu.pdf>. Acesso em: 16/07/2015.

PHIMMACHANH, S.; YING, Z.; BECKLINE, M. Bamboo Resources Utilization: A Potential Source of Income to Support Rural Livelihoods. **Applied Ecology and Environmental Sciences**, v. 3, n. 6, p. 176-183, 2015. DOI: 10.12691/aees-3-6-3.

QISHENG, Z. Characteristic and Prospects for Processing Approaches for Bamboo Resources. In: PROCEEDING OF INTERNATIONAL WORKSHOP ON BAMBOO INDUSTRIAL UTILIZATIONS. **International Network for bamboo and Rattan - INBAR**, October, 2003.

RIGUEIRA JR., I. O BAMBU como ESTRUTURA. **Boletim UFMG**, Nº 1730, Ano 37, março, Belo Horizonte, 2011.

Capítulo 1: ANATOMIA DE HASTES ADULTAS DE BAMBU: UMA REVISÃO²

Resumo – Bambus são monocotiledôneas de rápido crescimento, consideradas como regeneradoras ambientais devido à sua capacidade de ocupar solos degradados, reduzindo o processo erosivo. Além disso, várias de suas espécies são utilizadas como matérias primas ligno-celulósicas para diversos usos. Devido à grande importância deste grupo, esse trabalho teve como objetivo estudar a anatomia de hastes adultas de diferentes espécies de bambu, a fim de melhor caracterizar as diferenças estruturais existentes entre grupos. Foram levantadas em literatura informações sobre a caracterização morfológica e anatômica, com destaque para os padrões de classificação de fibras, células de parênquima, bainha de esclerênquima e canais vasculares (condutores xilema e floema) de diferentes espécies de bambu. As diferenças anatômicas possibilitaram classificar o material em quatro diferentes grupos, sendo os aspectos mais relevantes a forma do feixe fibrovascular e o teor de fibra.

Palavras-chave: Monocotiledôneas; Feixes fibrovasculares; Lignocelulose.

Stem anatomy of adult bamboo species: a review

Abstract - Bamboos are fast-growing monocotyledonous considered as environmental regenerators due to their ability to occupy degraded soils, decreasing erosive processes. Bamboos are also largely used as ligno-cellulosic raw material for several purposes. Due to their outstanding importance, the objective of this paper was to study the stem anatomy of different adult bamboo species to better characterize the structural divergences among different groups. Information was collected from literature review on morphological and anatomical characteristics, as fiber classification, parenchymatous cells, sclerenchyma sheaths and vascular bundles (xylem/phloem) of several bamboo species. Bamboo species may be sorted in four groups, considering mainly differences of vascular bundle shape and percentage of fibers.

Keywords: Monocotyledons; Fibrovascular bundles; Lignocellulosic.

Introdução

Bambus (Poaceae, Bambusoideae) são monocotiledôneas perenes, de rápido crescimento. Seu corpo vegetativo é constituído por materiais ligno-celulósicos formados por feixes líberolenhosos e envolvidos por células de parênquima, isto é, um tecido aproximadamente circular, englobando feixes vasculares de floema primário (líber) e tecido vascular de xilema primário

² Capítulo publicado como artigo de revisão na revista Pesquisa Florestal Brasileira, v. 38, e201701530, 2018.

(PANDA, 2011; YEASMIN et al., 2014). O porte das diferentes espécies de bambu varia desde herbáceos não lignificados, com poucos cm de altura, até bambus lenhosos de médio e grande porte, podendo atingir mais de 30 m de altura e 20 cm de diâmetro (MIRANDA et al., 2017).

Os registros científicos atuais, formados com base em análises filogenéticas (Bamboo Phylogeny Group, 2012), informam que existem no mundo 119 gêneros com 1.482 espécies de bambus, classificados em três tribos: (1) Arundinarieae (546 espécies), que são bambus lenhosos de climas temperados, apesar de alguns ocorrerem em altas elevações nos trópicos; (2) Bambuseae (812 espécies), que são bambus lenhosos de climas tropicais, mesmo que alguns ocorram fora dos trópicos e (3) Olyreae (124 espécies), que são bambus herbáceos (CLARK et al., 2015; NAYAK e MISHRA, 2016), esses de menor porte, que ocorrem no sub-bosque de florestas, apresentando colmos não lignificados e intolerância à radiação solar direta (GRECO e ZANNIN, 2017). Ainda que seja um grupo bem estudado, esses números continuam aumentando, devido às novas descobertas de espécies e gêneros (Bamboo Phylogeny Group, 2012).

As plantas de bambu são encontradas em quase todos os continentes, distribuindo-se em regiões tropicais, subtropicais e temperadas da Ásia, América, África e Oceania, numa faixa latitudinal de 51° N no Japão a 47° S na Argentina, desde o nível do mar até 4.000 m de altitude, embora a ocorrência de bambus herbáceos nunca exceda uma altitude de 1.500 m (PANDA, 2011; HAKEEM et al., 2015). Na América Latina ocorrem mais de 400 espécies, riqueza esta inferior às estimativas asiáticas, mas superiores às da África. No Brasil, são descritas até o momento 258 espécies nativas, sendo que, destas, 175 espécies em 12 gêneros são consideradas endêmicas (FILGUEIRAS; VIANA, 2017). Não obstante a maior diversidade desta planta ser encontrada no Sudeste Asiático e na América do Sul (PANDA, 2011; HAKEEM et al., 2015), muitas espécies são factíveis de serem introduzidas em outros locais, justamente por ocuparem uma ampla variedade de nichos ecológicos.

O termo “bambu” teve sua origem, provavelmente, no barulho provocado pelo estouro de seu colmo quando submetido ao fogo, ou seja, “bam-boo” (GRECO; CROMBERG, 2011). Esse material é utilizado desde os tempos mais remotos (BANIK, 2015) para inúmeros fins, podendo-se citar alimentação, tanto para os seres humanos como para animais, construção civil, movelaria, artesanato, fabricação de produtos têxteis, biomassa energética e outras matérias-primas industriais para os mais diferentes produtos (SMOLE, 2013). Deste modo, os bambus, por serem um recurso disponível em abundância em diversas regiões do mundo como fontes de matéria-prima, desempenham um importante papel no processo de desenvolvimento socioeconômico de algumas regiões (YEASMIN et al., 2014). Além disso, é o grupo de plantas

com a mais alta taxa de crescimento em biomassa no mundo (CHAOWANA et al., 2014; OKAHISA et al., 2018). Como exemplo, podem-se citar algumas espécies do gênero *Bambusa*, cujo incremento de biomassa pode variar de 50 a 100 ton.ha⁻¹.ano⁻¹, dependendo das condições do local (DIAS JÚNIOR et al., 2014). Todavia, apesar de todos estes atributos, não mais do que 50 espécies são utilizadas comercialmente até o momento. Portanto, é de suma importância investigar o emprego desta matéria-prima não convencional para utilização em diferentes produtos e setores (NAYAK; MISHRA, 2016).

Em termos morfo-anatômicos, os tecidos que formam o bambu apresentam somente crescimento primário e são constituídos por uma mistura de lignina, hemicelulose e celulose, organizadas em feixes fibrovasculares e células parenquimatosas (LIESE, 1980, 1985, 1998; NAYAK; MISHRA, 2016). Suas características marcantes são o formato alongado, grandes dimensões, estabilidade dimensional e alta resistência mecânica. Todavia, a espessura da parede da haste de bambu varia ao longo da sua altura e, em função disso, suas propriedades físicas e mecânicas também variam desde um extremo até o outro do bambu, o que pode causar dificuldades adicionais para a utilização desse material. Desta forma, esse trabalho teve como objetivo compilar informações da literatura sobre a anatomia de hastes de diferentes gêneros e espécies de bambu, visando sua caracterização anatômica.

Características morfológicas dos colmos de bambu

Diferentemente da maioria das plantas ligno-celulósicas, o bambu adulto não apresenta um tronco, mas um conjunto de colmos empilhados, que formam uma haste. Seus principais componentes estruturais são as raízes, rizomas, colmos, ramos, folhas e flores. O número de colmos encontrados em uma única haste de bambu varia conforme a espécie. O florescimento e a frutificação ocorrem somente entre 30 e 130 anos (BANIK, 2015). Portanto, as estruturas mais estudadas em bambus são colmos e rizomas.

O colmo é a parte superior ao solo mais distinguível da planta, sendo caracterizado como um tubo cilíndrico e oco, com formato arqueado, semiarqueado ou ereto (CHAOWANA, 2013; LIESE; TANG, 2015), compreendendo dois nós, sendo que o comprimento do entrenó difere consideravelmente entre as espécies. Geralmente, o comprimento dos entrenós é maior no meio da haste e, comparativamente, nas espécies em que o período de crescimento começa mais cedo. Uma característica importante é a espessura de suas paredes, pois apresentam grande impacto nas propriedades mecânicas (BANIK, 2015; NAYAK; MISHRA, 2016).

Na parede do colmo, o número de feixes vasculares sofre pouca variação com o aumento da altura da haste de bambu, enquanto a fração de parênquima do tecido diminui (BANIK, 2015; LIESE; TANG, 2015; NAYAK; MISHRA, 2016). Assim, da base para o topo, a redução no diâmetro de um colmo é bastante particular de cada espécie. Isto vem acompanhado também por uma redução da espessura de parede do colmo, devido à menor proporção de células de parênquima, resultando em aumento da sua densidade nas regiões mais apicais (LIESE; TANG, 2015; OKAHISA et al., 2018). Ainda que a estrutura anatômica de um colmo de bambu seja geralmente bastante uniforme, apresentando pequenas variações entre espécies, algumas espécies são mais adequadas para usos distintos.

O colmo é complementado pelo sistema de ramificação aérea, composto por ramos e folhas. Existem dois tipos de folhagem: uma denominada bainha de colmo ou folha caulinar e a outra, chamada de folhas verdes. A bainha é uma folha modificada, provisória, grande e rígida, com as mesmas partes das folhas tradicionais, mas em proporções diferentes. Apresenta-se como uma estrutura de revestimento que ocorre na fase inicial de crescimento, caindo à medida que o bambu se transforma em um indivíduo maduro. Esta folhagem protege o rebento de bambu, isto é, o broto, durante a fase inicial de seu crescimento até atingir o tamanho adulto (JANSSEN, 2000). As folhas verdes ocorrem, por sua vez, nos indivíduos adultos que já perderam as folhas caulinares (BANIK, 2015; NAYAK; MISHRA, 2016). Em torno do quinto nó do colmo, ou entre 150 e 200 cm acima do nível do solo, está o ponto em que a bainha do colmo possui todas as características típicas da espécie. No local de fixação existem diferentes combinações de características envolvendo a aurícula, as cerdas e as lígulas. Essas características, assim como suas cores, são traços importantes para a identificação das espécies. As aurículas e cerdas podem ou não estar presentes. Caso ocorram, estas estruturas se localizarão em cada lado das bordas, tanto em bainhas do caule como na folhagem verde dos bambus adultos. A lígula está localizada internamente, entre as aurículas e cerdas localizadas de cada lado na bainha (BANIK, 2015).

Os rizomas são os caules subterrâneos de um bambu, os quais servem para captação, transporte e armazenamento de nutrientes e para reprodução vegetativa através do desenvolvimento lateral, podendo se converter em brotos ou em um novo rizoma. Além disso, quando bem desenvolvidos, são bastante ramificados e possuem função estrutural. A composição de seus tecidos compreende, em média, 62% de células de parênquima, 20% de fibras e 18% de tecidos condutores, formados pelo xilema e floema (NAYAK; MISHRA, 2016). Os rizomas, do ponto de vista anatômico, são diferentes dos colmos, mas semelhantes

na sua subdivisão, por apresentarem nós e entrenós, ainda que estes últimos sejam mais curtos e possuam menor diâmetro (NAYAK; MISHRA, 2016). A importância dos rizomas reside no fato de que tanto o crescimento quanto a ramificação padrão dos bambus dependem dos dois principais sistemas de rizomas, denominados de paquimorfos (simpodial ou entouceirante) ou leptomorfos (monopodial ou alastrante). As espécies com rizomas leptomorfos, muitas vezes, apresentam tilos nos feixes fibro-vasculares no espaço intercelular entre os dois vasos de metaxilema. Naquelas com sistema de rizoma paquimorfo, isto não ocorre. Devido a estas diferenças, a presença de tilos pode ser utilizada como uma característica diagnóstica (GROSSER; LIESE, 1971).

Características anatômicas dos colmos de bambu

A estrutura dos colmos de um bambu compõe-se externamente de uma epiderme e internamente por outros dois tecidos, formado por células de parênquima e feixes fibrovasculares (HABIBI; LU, 2014). Estes últimos são constituídos por células lignificadas e espessas, formada por numerosos feixes de fibras e células esclerenquimáticas, o que dificulta a movimentação lateral de líquidos nos colmos (PEREIRA; BERALDO, 2007). Na parte externa, os colmos são revestidos por uma camada de cera e por outra de cutina, que é rica em sílica (Figura 1), conferindo resistência e proteção contra o ataque de animais. Essa característica também provoca o desgaste de ferramentas de corte (JANSSEN, 2000).



Figura 1. Representação transversal e axial do colmo de duas espécies de bambu. Seção transversal na região do nó: A) *Dendrocalamus asper*. B) *Phyllostachys aurea*. Seção axial na região do nó: C) *Dendrocalamus asper*. D) *Phyllostachys aurea*.

Via de regra, anatomicamente, os colmos são formados por células de parênquima (50%), feixes de fibras (40%) e feixes vasculares (10%) (LIESE, 1980, 1998; PEREIRA; BERALDO, 2007; LIESE; TANG, 2015; NAYAK; MISHRA, 2016). Na maioria das espécies, as fibras

concentram-se na proporção de 10% na área interna do colmo e 60% na região próxima à casca (JANSSEN, 2000). Por sua vez, o percentual de parênquima cresce da região mais próxima à casca para o interior da parede do bambu, com o inverso ocorrendo com os feixes fibrovasculares, os quais são mais numerosos em camadas mais próximas da casca.

Comparativamente à estrutura da madeira, a estrutura anatômica dos colmos é constituída por fibras com maiores dimensões de parede celular incorporadas em lignina (GHAVAMI et al., 2003), apresentando uma variação na organização da seção transversal no nó do colmo. Nessa região, ocorrem numerosos feixes fibrovasculares envolvidos por células de parênquima (TOMAZELLO FILHO; AZZINI, 1988), as quais são ricas em substâncias de reserva na forma de amidos (LIESE, 1980, 1985). Nos entrenós, os feixes vasculares são constituídos por elementos de vaso de metaxilema, floema, bainha de fibras de protoxilema e, dependendo da espécie, de feixes de fibras adicionais (LIESE, 1998).

A maior concentração dos feixes de fibras ocorre na região próxima da casca, de coloração mais escura, conferindo maior resistência. Em contraste, na face oposta, próximo ao centro do colmo, ocorre maior concentração de células de parênquima, de coloração mais clara, proporcionando menor resistência (JANSSEN, 2000). Os feixes fibrovasculares, com seus aglomerados de fibras dentro do tecido do parênquima, contribuem fortemente para o caráter estrutural (LIESE; TANG, 2015). Na Figura 2 são apresentados os feixes fibrovasculares, no sentido transversal das espécies *Dendrocalamus asper* e *Phyllostachys aurea*.

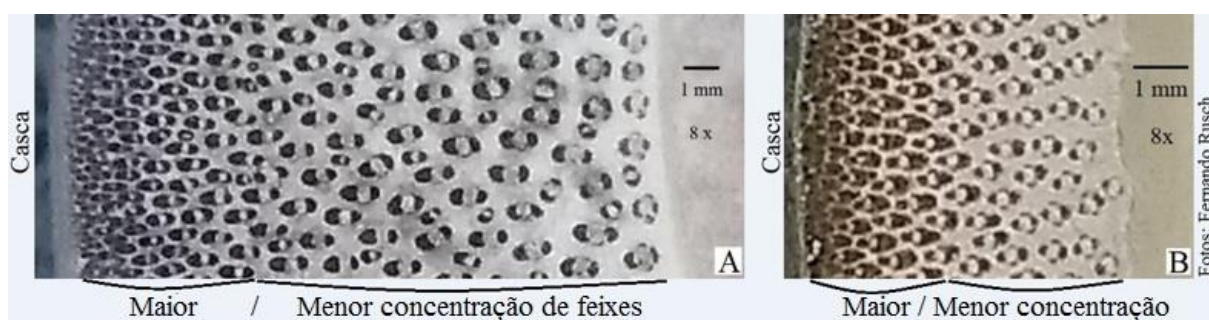


Figura 2. Representação de lâminas com os feixes fibrovasculares. A) *Dendrocalamus asper*. B) *Phyllostachys aurea*.

Na estrutura anatômica dos entrenós de bambu, as células estão dispostas no sentido longitudinal, não apresentando células dispostas no sentido radial (LIESE, 1980). Na seção transversal do nó, ocorrem numerosos feixes fibrovasculares envolvidos por células de parênquima, com uma epiderme constituída por células epiteliais e de esclerênquima.

Os feixes fibrovasculares da região nodal seguem de forma direta e indireta de um entrenó para o outro. Nessa região, parte destes feixes se bifurca, conectando-se com: (i) a zona periférica ou parte externa da epiderme, constituída pelo anel nodular ou anel da bainha ou com a gema dormente; ou então, com (ii) a zona interna ou vasos do diafragma do nó, conforme ilustrado na Figura 3.

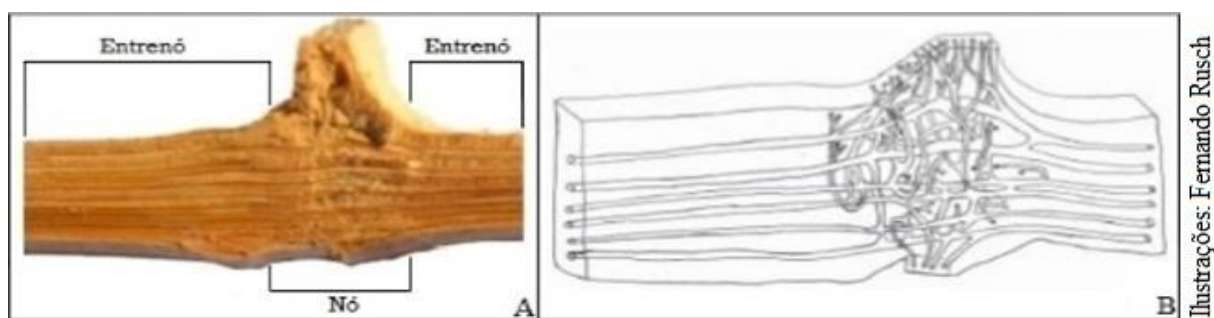


Figura 3. Feixes fibrovasculares da região do nó e do entrenó. A) Representação da região do nó e entrenó em bambu; B) Ilustração da estrutura interna desses feixes no interior do colmo.

Dessa forma, dentro do nó ocorrem várias ramificações dos vasos, que possibilitam sua conexão tanto ao entrenó superior quanto ao inferior (LIESE, 1980, 1985). Além disso, ocorrem bifurcações secundárias de menor espessura, que são responsáveis pela conexão com os diafragmas nodais, ligando a parte periférica e a parte interna do nó (PEREIRA, 2012).

Com relação à estrutura das fibras, Parameswaran e Liese (1976) constataram que seu comprimento varia de 2 a 4 mm, entre e dentro das espécies. Nas células de parênquima podem ocorrer dois padrões de comprimento. A parede celular das células mais curtas, com citoplasma mais denso, permanece na maior parte não-lignificada, mesmo em colmos maduros. As células mais longas apresentam uma estrutura poli-laminada, constituída por diversas lamelas com orientação de fibrilas alternadas, de forma análoga ao que ocorre na parede celular das fibras, as quais tornam-se lignificadas, gradualmente, com o envelhecimento do indivíduo (PARAMESWARAN; LIESE, 1976; NAYAK; MISHRA, 2016).

Os feixes vasculares incorporados no tecido parenquimático influenciam na flexibilidade e na estabilidade do colmo (NAYAK; MISHRA, 2016). No bambu ocorrem dois tipos de orientação de microfibrilas: as lamelas estreitas se alinham com ângulo fibrilar de 80 a 90° em relação ao eixo vertical, e as mais amplas, alinham-se com ângulo fibrilar de 2 até 20°, podendo ser consideradas quase que paralelas ao eixo longitudinal (WANG et al., 2012). Entretanto, nas espécies arbóreas, a orientação da maioria das microfibrilas da camada S2 da parede celular está alinhada quase que paralelamente ao eixo axial.

O parênquima é o tecido que aparece em maior proporção, sendo o local onde os feixes fibrovasculares são incorporados, fazendo com que ambos os elementos contribuam conjuntamente para sua estabilidade e flexibilidade (LIESE; TANG, 2015). O parênquima possui como principal função estocar nutrientes e água, podendo armazenar quantidades significativas de amido (BERALDO; AZZINI, 2004). Comumente, as células do parênquima são menores na parte externa do bambu e crescem gradativamente em direção à sua parte interna. Nas camadas da parede interna do bambu, o parênquima encontra-se concentrado, representando de 40% a 60% de sua composição. Todavia, nas camadas externas, o mesmo diminui gradativamente. Na direção longitudinal, ocorre redução da concentração de parênquima no sentido base-topo, com média de 60% na base e de 40% na parte apical (LIESE; TANG, 2015).

Os feixes vasculares constituem, aproximadamente, 10% da proporção do colmo, representando seus principais espaços vazios, sendo o ponto de menor resistência mecânica. Estes feixes, os quais compreendem o xilema e o floema primários, são menores e mais numerosos na periferia do colmo e maiores e em menor número na sua parte interna (BERALDO; AZZINI, 2004). No interior da parede do colmo, o número total de feixes diminui da base para o topo, porém sua densidade aumenta (PEREIRA; BERALDO, 2007).

Padrões para classificação de bambu

Nas décadas de 1960 e 1970, Grosser e Liese (1971) examinaram atentamente o parênquima e os feixes vasculares em diversas espécies de bambu. Nessa pesquisa, foi realizada a caracterização da estrutura anatômica de hastes adultas de diferentes gêneros e espécies de bambu, por meio de amostras de colmos coletadas em vários países asiáticos, mais especificamente nos seguintes locais: Índia (DehraDun, F.R., Jardim Botânico), Bangladesh (Florestas em torno de Chittagong/Bengal Oriental, na obra referidos como Paquistão), Tailândia (província de Kanchanaburi), Indonésia (Bogor, Jardim Botânico), Filipinas (Laguna, Campus Florestal), Taiwan (Floresta experimental da Universidade Nacional de Taiwan) e Japão (Floresta de Kyoto). Além disso, alguns colmos completos de várias espécies, recolhidos entre 1957 e 1960, em DehraDun e Bogor, foram utilizados para investigações adicionais. Desta forma, foram avaliados 1.200 entrenós de 250 colmos de 52 espécies pertencentes a 14 gêneros, permitindo caracterizar diversos aspectos anatômicos, além de classificar as espécies em virtude de seus feixes vasculares.

A partir do trabalho de Grosser e Liese (1971), tornou-se possível classificar, de maneira genérica, o feixe vascular no colmo de bambu como sendo constituído por dois vasos de metaxilema maiores (40-120 μm) com um ou dois elementos de protoxilema, com o floema em forma de tubos crivados de parede fina, não-ligados e conectados com células companheiras. Esse tecido condutor funciona ao longo da vida do bambu sem adição de qualquer novo tecido condutor, em contraste às madeiras de coníferas e dicotiledôneas, que possuem atividade cambial. Em bambus mais antigos, os vasos e os tubos crivados às vezes tornam-se impermeáveis, devido ao depósito de substâncias semelhantes à goma. Também ocorre o bloqueio de tubos crivados, por expansões semelhantes à tilose (LIESE, 1980). Na Figura 4 são ilustradas as estruturas de um feixe fibrovascular.

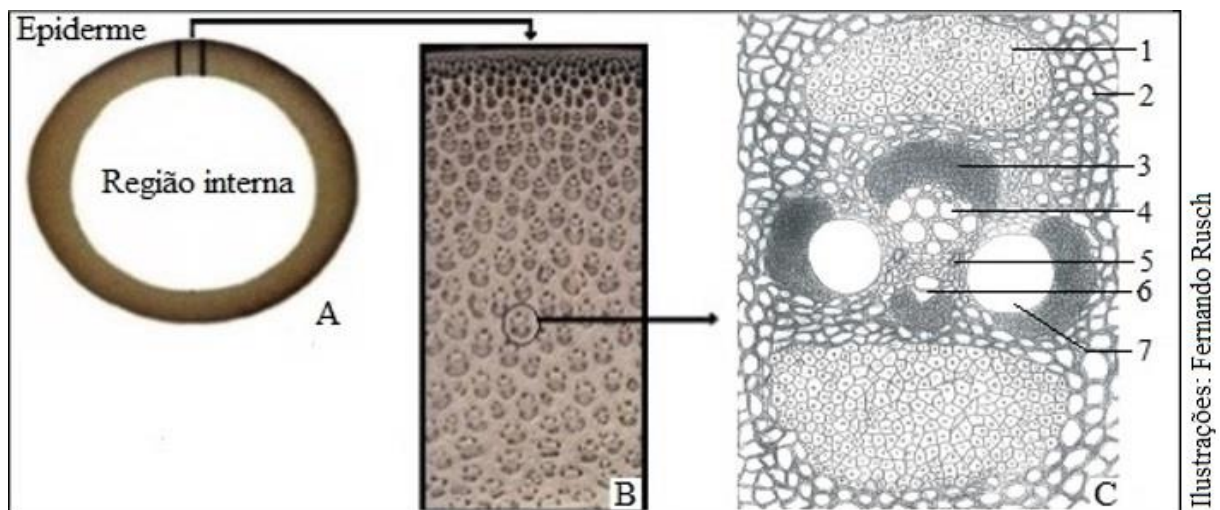


Figura 4. Representação de Feixes fibrovasculares. A) Seção transversal do colmo. B) Faixa da seção transversal. C) Estrutura de um feixe fibrovascular embutido em tecido de parênquima, com descrição de seus elementos: (1) bainha de fibras; (2) células de parênquima; (3) bainha esclerênquima; (4) floema; (5) pequenos elementos do metaxilema; (6) espaço intercelular derivado do protoxilema; (7) vasos de metaxilema.

Para Fuji (1985), a maior concentração de feixes vasculares foi verificada na parte externa superior da haste de bambu (3 feixes mm^{-2}), sendo mais baixa (0,5 feixes mm^{-2}) na parte interna da base. Com relação à distribuição dos feixes vasculares, o mesmo autor constatou que 50-80% estão localizados no terço externo da parede, 10-35% no meio e apenas 10-20% no terço interno. Assim, para determinar o número e densidade, o tamanho médio é um fator importante, sendo que quanto maiores os feixes, menor o número presente numa dada área. O floema, os vasos do metaxilema e os espaços intercelulares derivados dos elementos do protoxilema de um feixe vascular são circundados por: (i) bainhas de fibras; (ii) cordão de esclerênquima; e (iii) células

de parênquima, diferindo em tamanho e forma, de acordo com as espécies de bambu e sua posição dentro do colmo.

Devido a essas diferenças anatômicas dos feixes vasculares (forma, quantidade e tamanho), que também são influenciadas pela altura do entrenó e sua espessura de parede, é possível estabelecer uma classificação de diferentes tipos de bambu. Atualmente, é possível agrupar os gêneros de bambu em quatro tipos (Tabela 1): o tipo I engloba todos os leptomorfos (espécies alastrantes), que exibem semelhança na estrutura dos seus feixes vasculares. Os tipos anatômicos II, III e IV são representados pelos paquimorfos (espécies entouceirantes) (GROSSER; LIESE, 1971; LIESE, 1980, 1985).

Tabela 1. Classificação dos tipos de feixes vasculares básicos em bambus

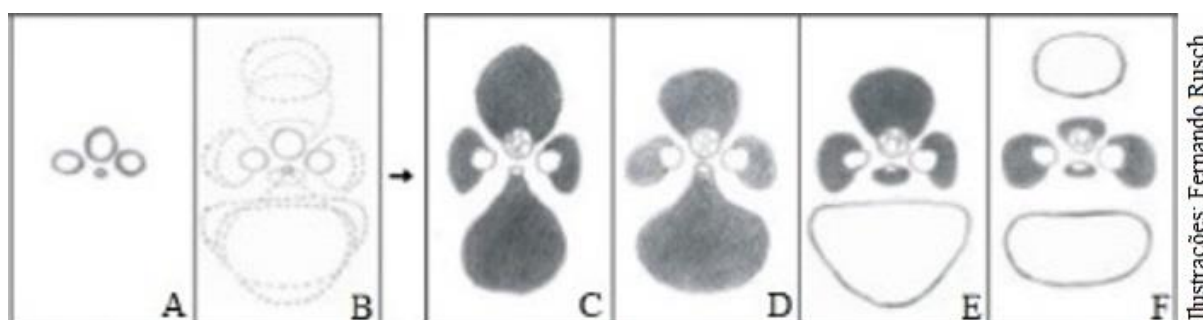
Tipo	Características	Ocorrência*
I	Formado de uma única parte, ou seja, da cadeia vascular central, apresentando apenas as bainhas de esclerênquima como tecido de suporte. Além disso, no seu espaço intercelular ocorrem tiloses.	Nesse tipo estão agrupadas as espécies com rizomas leptomorfos (gêneros alastrantes), bastante invasivos, que se desenvolvem a partir da formação de uma complexa rede de rizomas subterrâneos, formada pelos gêneros <i>Arundinaria</i> , <i>Phyllostachys</i> , <i>Tetragonocalamus</i> .
II	Semelhante ao anterior (com uma cadeia vascular central), contudo o espaço intercelular é maior, além de não ocorrer tilose.	Formado por bambus que apresentam rizomas paquimorfos (entouceirantes) ou piramidais, em aglomerado ou em formação única, subdivididos em dois grupos: um formado pelos gêneros <i>Melocanna</i> , <i>Schizostachyum</i> e <i>Teinostachyum</i> , em que ocorrem feixes vasculares do tipo II e III nos entrenós basais; e outro formado pelo gênero <i>Cephalostachyum</i> , onde ocorrem somente feixes vasculares do tipo II.
III	Apresenta duas partes, sendo uma cadeia vascular central (com fio de fibra) e uma de fibras (afastada e abaixo da cadeia vascular), mas com espaço intercelular menor que os tipos anteriores.	Nas espécies que possuem rizomas paquimorfos (entouceirantes) amontoados, sendo alguns do gênero <i>Oxytenanthera</i> , com apenas este tipo, contudo os colmos basais, de <i>Bambusa</i> , <i>Dendrocalamus</i> , <i>Gigantochloa</i> e <i>Thyrsostachys</i> podem estar combinados com o tipo IV, enquanto <i>Melocanna</i> , <i>Schizostachyum</i> e <i>Teinostachyum</i> , combinados com o tipo II.
IV	Apresenta três partes, sendo uma cadeia vascular central (com fio de fibra) e outras duas de feixes de fibras em lados opostos.	Em espécies formadoras de aglomerados com rizomas paquimorfos (entouceirantes), como os gêneros <i>Bambusa</i> , <i>Dendrocalamus</i> , <i>Gigantochloa</i> , <i>Thyrsostachys</i> , ocorrem sempre combinados com o tipo III, principalmente nos colmos basais, porém raramente nos medianos.

Fonte: Modificado de Grosser e Liese (1971) e Liese (1980, 1985).

Apesar de existir um padrão de tecido semelhante em cada entrenó, com forma, tamanho e distribuição dos feixes fibrovasculares definidos para cada seção, ocorre variação dessas características entre os entrenós, que também são influenciados pela posição em altura na haste, tornando-se menores no sentido base-topo. Da mesma forma, essas são influenciadas pela redução gradual da espessura da parede. Isto significa que existe uma estreita correlação entre as características morfológicas e histológicas, sendo que quanto mais se reduz a espessura da parede, maiores são as diferenças anatômicas (LIESE, 1980, 1985).

Assim, devido a esta variação na forma, tamanho e padrão dos feixes vasculares, um entrenó da base da haste pode exibir uma estrutura diferente da parte do meio, a qual, por sua vez, pode igualmente diferir da parte superior do colmo. Esta afirmação se confirma quando se verifica que em todas as espécies de bambu investigadas, o tamanho dos feixes vasculares diminui de forma constante da base para o topo. Esta tendência é mais acentuada em espécies que possuem feixes grandes na base (GROSSER; LIESE, 1971).

Em virtude do exposto, os autores deste trabalho propõem um sistema de classificação anatômica dos feixes vasculares, conforme ilustrados na Figura 5.



Ilustrações: Fernando Rusch

Figura 5. Ilustrações do formato padrão e dos diferentes tipos de Feixes fibrovasculares. A) Elementos básicos de um feixe vascular padrão em todas as espécies; B) Variações que ocorrem nos diferentes tipos; C) Tipo I; D) Tipo II; E) Tipo III; F) Tipo IV.

Os tecidos condutores, sendo tanto os vasos de metaxilema quanto do floema, estão rodeados por bainhas de esclerênquima. Além disso, ocorrem fibras no interior e no lado externo do feixe vascular, as quais diferem consideravelmente em tamanho, forma e localização de acordo com a posição em altura e com a espessura da parede do colmo, características estas influenciadas pela espécie de bambu (LIESE, 1980, 1985). Existem espécies que apresentam combinação de diferentes tipos de feixes fibro-vasculares, principalmente em função da posição em altura da haste e de sua espessura de parede

(GROSSER; LIESE, 1971). Nas pesquisas desenvolvidas por Grosser e Liese (1971) e, posteriormente, de CHAOWANA et al. (2014), foi demonstrado que existem variações no tamanho e quantidade de feixes vasculares, tanto no sentido longitudinal como transversal.

Com relação à forma, na parte interna do colmo, os feixes vasculares são quase circulares ou arredondados (mais ovais e maiores), alterando gradualmente para forma elíptica (mais longos e menores), ao aproximarem-se da região externa da parede. A variação destas características microscópicas do bambu afeta diretamente as propriedades físicas e mecânicas, interferindo no seu processamento e utilização (GROSSER; LIESE, 1971; LIESE, 1985; CHAOWANA et al., 2014).

Além da diferenciação dentro e entre os feixes vasculares, existe variação das dimensões das fibras dos colmos de bambu (CHAOWANA, 2013; DIXON; GIBSON, 2014; LIESE; TANG, 2015), tanto em comprimento quanto em espessura, em virtude da sua posição na haste, o que pode reduzir ou aumentar a resistência na compressão e tração (PEREIRA, 2012). As fibras estão presentes nas extremidades dos feixes vasculares como “bainhas de esclerênquima” e são alongadas e afiladas, muitas vezes bifurcadas nas extremidades e alinhadas na direção longitudinal do colmo (NAYAK; MISHRA, 2016). Estas fibras servem de proteção para os feixes vasculares, compondo o tecido mecânico da planta, o qual tem por função essencial dar resistência ao indivíduo. Ainda que representem cerca de 40-50% da área total de seu tecido, constituem entre 60-70% de sua massa, considerando-se peso total (LIESE, 1980; PEREIRA; BERVALDO, 2007; NAYAK; MISHRA, 2016). Por sua vez, no sentido longitudinal, ocorre aumento no comprimento da fibra até aproximadamente 60% da distância entre a região próxima ao nó inferior e o superior, invertendo-se esta tendência, principalmente nos 10% finais do entrenó (LIESE, 1985).

A densidade das fibras, na seção transversal do bambu, varia ao longo da sua espessura, ocorrendo um aumento da porcentagem do interior para o exterior enquanto o teor de parênquima diminui. O tamanho do feixe vascular é grande na camada interna e média, tendendo para menor e mais denso na camada externa (CHAOWANA et al., 2014). No sentido longitudinal, as fibras mais longas estão situadas na parte mediana e as mais curtas nas extremidades, próximas aos nós (TOMAZELLO FILHO; AZZINI, 1987; PEREIRA; BERVALDO, 2007).

A região superior da haste de bambu apresenta maior proporção de fibras, resultando em superior esbeltez do material, em comparação à sua parte basal, que contém mais parênquima (GROSSER; LIESE, 1971). Essas variações no teor de fibra interferem na densidade e nas propriedades que devem ser consideradas para seu uso.

Em geral, a distribuição percentual dos elementos constituintes do bambu (parênquima, fibras e células condutoras) mostra um padrão definido. Além disso, a parte externa (córtex) é constituída por células epidérmicas cobertas com uma camada cerosa que impedem a perda de umidade no colmo (CHAOWANA, 2013; NAYAK; MISHRA, 2016). O parênquima e as células condutoras são mais frequentes no terço inferior da haste, enquanto que no terço superior a porcentagem de fibras é maior. Desta forma, a prática comum de não utilizar a porção superior dos bambus cortados na floresta é, portanto, um desperdício no que diz respeito ao teor de celulose (GROSSER; LIESE, 1971; LIESE, 1980).

Alterações estruturais em função da idade

O bambu inicia seu processo de envelhecimento entre os primeiros três a quatro anos de idade, continuando paulatinamente até sua senescência (LIESE; WEINER, 1997; LIESE; TANG, 2015). Esse processo acaba por interferir no aspecto estrutural, influenciando suas propriedades e, conseqüentemente, na possibilidade de utilização do material. Isto ocorre devido ao espessamento das paredes de fibras e células do parênquima, pela deposição de lamelas adicionais nas camadas com posterior lignificação, resultando em aumento das propriedades de densidade e resistência. Diferentemente das madeiras, o bambu, por não apresentar crescimento secundário, possui processo de enrijecimento através de oito lamelas, divididas em duas classes, largas e estreitas, que variam em proporção à largura do conjunto de lamelas. Numa comparação com a madeira, essas oito lamelas correspondem à parede celular secundária. Informações adicionais podem ser obtidas em consulta aos trabalhos desenvolvidos por Parameswaran e Liese (1976), Liese (1985) e Liese e Tang (2015).

Desta forma, os colmos considerados adequados para qualquer utilização possuem idade entre três e quatro anos. Os mais jovens e imaturos, devido a um reduzido teor de lignina, apresentam-se menos resistentes, sendo os preferidos para o artesanato pela facilidade de trabalhá-los durante sua utilização. Da mesma forma, o reduzido teor de lignina é considerado um aspecto benéfico durante o processo de polpação. Contudo, a utilização de colmos jovens pode ser considerada prejudicial para a vitalidade da cultura, pois isso pode exigir maior quantidade de energia para o crescimento do restante da população, reduzindo a produtividade no ano seguinte. Depois de transcorridos cerca de 8 a 10 anos, o bambu inicia sua fase natural de senescência. Basicamente, nesta fase da vida do bambu ocorre obstrução dos vasos condutores por tilos e outras substâncias, causando ineficiência fisiológica e provocando a morte de indivíduos dentro de uma touceira, maciço ou bosque de bambu (LIESE; TANG, 2015).

Esta condição, contudo, não causa impacto nas suas propriedades tecnológicas. Somente em situações de debilidade, ocorridas após o florescimento, é que são perceptíveis danos estruturais às propriedades tecnológicas do bambu. Neste cenário, a estrutura do tecido líbero-lenhoso torna-se frágil, sendo que, em muitas ocasiões, todo o cólon se curva e quebra. Ainda que este processo não esteja completamente compreendido (LIESE, 2008), o que se sabe é que ele não está associado ao processo de biodegradação, podendo ser resultado de alterações bioquímicas que afetam a composição do material lignocelulósico.

Outro aspecto a ser levado em conta é que não são somente os aspectos internos da composição do colmo de bambu que determinam suas características morfológicas e os parâmetros anatômicos, ainda que estes pareçam bastante estáveis. Eles também sofrem influência das condições locais (LATIF; LIESE, 2002). Isto tanto é verdade que um maior teor de fibras pode ocorrer em áreas com condições climáticas mais secas e topografia declivosa, possivelmente redundando em um material com maior densidade e com propriedades de resistência aumentadas. Da mesma forma, condições de sítio com elevada fertilização afetam a produção de brotos, o diâmetro da fibra e a espessura da parede, mas, aparentemente, não a composição anatômica (ABASOLO et al., 2005).

Considerações finais

A anatomia de hastes adultas de bambu, apesar de seguir uma estrutura relativamente padronizada com relação aos teores de parênquima, fibras e feixes vasculares, apresenta diferenças entre os diversos gêneros. Estas diferenças possibilitam classificar este material em quatro diferentes grupos. Com relação às mesmas, constata-se que o parênquima e as células condutoras são mais frequentes no terço interno da parede, enquanto que no terço externo a porcentagem de fibras é maior. Ainda, com relação às variações dos principais elementos do bambu, a porção superior da haste apresenta maior proporção de fibras, em comparação à basal, que contém mais parênquima e feixes vasculares de maiores dimensões. Contudo, os aspectos mais relevantes para a classificação do bambu em diferentes grupos são relativos à forma do feixe fibrovascular e o seu teor de fibra.

Considerando este estudo, os autores concluem que apesar das variações constatadas entre espécies de bambu, aliado ao fato desta planta não apresentar crescimento secundário, não sendo classificado como madeira, este material líbero-lenhoso pode ser utilizado de forma complementar à madeira, desde que seja transcorrido um período de tempo suficiente para consolidar o processo de lignificação de seus elementos anatômicos. Além disso, para usos

direcionados para a utilização de suas fibras, o maior potencial se concentra principalmente na porção superior e no terço externo da haste.

Agradecimentos

O presente trabalho foi realizado com o apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de financiamento 001.

Referências bibliográficas

ABASOLO, W. P.; FERNANDEZ, E. C.; LIESE, W. Fiber characteristics of *Gigantochloa levis* and *Dendrocalamus asper* as influenced by organic fertilizers. **Journal of Tropical Forest Science**, v. 17, n. 2, p. 297-305, 2005.

BANIK, R. L. Morphology and growth. In: LIESE, W.; KÖHL, M. (Ed.). **Tropical forestry, bamboo: the plant and its uses**. Switzerland: Springer International Publishing, 2015. p. 43-89. DOI: 10.1007/978-3-319-14133-6_3.

BAMBOO PHYLOGENY GROUP. An updated tribal and subtribal classification of the bamboos (Poaceae: Bambusoideae). **Bamboo Science & Culture**, v. 24, n. 1, p. 1-10, 2012.

BERALDO, A. L.; AZZINI, A. **Bambu: características e aplicações**. Guaíba: Agropecuária, 2004. 128 p.

CHAOWANA, P. Bamboo: an alternative raw material for wood and wood-based composites. **Journal of Materials Science Research**, v. 2, n. 2, p. 90-102, 2013. DOI: 10.5539/jmsr.v.2n2p90.

CHAOWANA, P.; BARBU, M. C.; FROHWALD, A. Bamboo: a functionally graded composite material. **Forest Products Journal**, v. 65, n. 3/4, p. 48-53, 2014.

CLARK, L. G.; LONDOÑO, X.; RUIZ-SANCHEZ, E. Bamboo taxonomy and habitat. In: Liese, W. & Köhl, M. (Ed.). **Tropical forestry, bamboo: the plant and its uses**. Switzerland: Springer International Publishing, 2015. p. 1-30. DOI: 10.1007/978-3-319-14133-6_3.

DIAS JÚNIOR, A. F.; ANDRADE, A. M.; COSTA JÚNIOR, D. S. Caracterização de briquetes produzidos com resíduos agrofloretais. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 34, n. 79, p. 225-234, 2014. doi: 10.4336/2014.pfb.34.79.613.

DIXON, P. G. & GIBSON, L. J. The structure and mechanics of Moso bamboo material. **Journal of the Royal Society Interface**, v. 11, p. 1-12, 2014. DOI: 10.1098/rsif.2014.0321.

FILGUEIRAS, T. S.; VIANA, P. L. Bambus brasileiros: morfologia, taxonomia, distribuição e conservação. In: Drumond, P. M. & Wiedman, G. (Ed.). **Bambus no Brasil: da biologia à tecnologia**. Rio de Janeiro: ICH, 2017. p. 10-27.

FUJJI, T. Cell-wall structure of the culm of *Azumanezasa* (*Pleioblastus chino* Max.). **Mokuzai Gakkaishi**, v. 31, p. 865-872, 1985.

GHAVAMI, K.; PACIORNIK, S.; RODRIGUES, C. S. Bamboo: functionally graded composite material. **Asian Journal of Engineering**, v. 4, n. 1, p. 1-10, 2003.

- GRECO, T. M.; CROMBERG, M. **Bambu: cultivo e manejo**. Florianópolis: Insular, 2011. 184 p.
- GRECO, T. M. & ZANNIN, A. Tribo Olyreae (Poaceae: Bambusoideae) na Ilha de Santa Catarina, Brasil. **Rodriguésia**, v. 68, n. 2, p. 557-567, 2017. DOI: 10.1590/2175-7860201768218.
- GROSSER, D.; LIESE, W. On the anatomy of Asian bamboos, with special reference to their vascular bundles. **Wood Science and Technology**, v. 5, n. 4, p. 290-312, 1971. DOI: 10.1007/BF00365061.
- HABIBI, M. K.; LU, Y. Crack. Propagation in bamboo's hierarchical cellular structure. **Scientific Reports**, v. 4, n. 5598, p. 1-7, 2014. DOI: 10.1038/srep05598.
- HAKEEM, K. R.; IBRAHIM, S.; IBRAHIM, F. H.; TOMBULOGLU, H. Bamboo biomass: various studies and potential applications for value-added products. In: Hakeem, K. R. et al. (Ed.). **Agricultural biomass based potential materials**. Switzerland: Springer International Publishing, 2015. p. 231-244.
- JANSSEN, J. J. A. **Designing and building with bamboo**. Beijing: INBAR, 2000. 211 p. (Technical report, 20).
- LATIF, A. M.; LIESE, W. Culm characteristics of two bamboos in relation to age, height and site. In: Kumar, A. et al. (Ed.). **Bamboo for sustainable development**. San José, Costa Rica: INBAR, 2002. p. 223-233.
- LIESE, W. Anatomy and properties of bamboo. In: Liese, W. (Ed.). **Bamboos: biology, silvics, properties, utilization**. Hamburg: GTZ, 1985. p. 196-208.
- LIESE, W. Anatomy of bamboo. In: Lessard, G. & Chouinard, A. (Ed.). **Bamboo research in Asia: proceedings of a workshop held in Singapore**. Ottawa, CA: IDRC, 1980. p. 161-164.
- LIESE, W.; TANG, T. K. H. Properties of the bamboo culm. In: LIESE, W.; KOHL, M. (Ed.). **Tropical forestry, bamboo: the plant and its uses**. Switzerland: Springer International Publishing, 2015. p. 227-256. DOI: 10.1007/978-3-319-14-133-6_8.
- LIESE, W. **The anatomy of bamboo culms**. Beijing: INBAR, 1998. 208 p. (Technical report, 18).
- LIESE, W. The blooming of *Melocanna baccifera* in Northeast India and its consequences. **Bamboo Society of Australia**, v. 10, n. 1, p. 20-22, 2008.
- LIESE, W.; WEINER, G. Modifications of bamboo culm structures due to ageing and wounding. In: CHAPMAN, G. (Ed.). **The bamboos**. London: Academic, 1997. p. 313-322.
- MIRANDA, E. M. de; AFONSO, D. G.; PONTES, S. M. de A.; SOUZA, J. C. N. de; LIMA, D. do N.; FREITAS JÚNIOR, J. L. de. Estrutura populacional e o potencial de uso de *Guadua* cf. *superbana* região do Alto Acre. In: Drumond, P. M. & Wiedman, G. (Ed.). **Bambus no Brasil: da biologia à tecnologia**. Rio de Janeiro: ICH, 2017. p. 161-178.
- NAYAK, L.; MISHRA, S. P. Prospect of bamboo as a renewable textile fiber, historical overview, labeling, controversies and regulation. **Fashion and Textiles**, v. 3, n. 2, p. 1-23, 2016. DOI: 10.1186/s40691-015-0054-5.

OKAHISA, Y.; KOJIRO, K.; KIRYU, T.; OKI, T.; FURUTA, Y.; HONGO, C. Nanostructural changes in bamboo cell walls with aging and their possible effects on mechanical properties. **Journal of Materials Science**, v. 53, p. 3972-3980, 2018. DOI: 10.1007/s10853-017-1886-8.

PANDA, H. **Bamboo plantation and utilization handbook**. Delhi: Asia Pacific Business Press, 2011. 568 p.

PARAMESWARAN, N.; LIESE, W. On the fine structure of bamboo fibres. **Wood Science Technology**, v. 10, p. 231-246, 1976.

PEREIRA, M. A. dos R.; BERALDO, A. L. **Bambu de corpo e alma**. Bauru: Canal6, 2007. Available from: <http://www.canal6.com.br/ed/wp-content/download/Trecho_inicial_Bambu.pdf>. Access on: 16 Jul. 2017.

PEREIRA, M. A. dos R. **Projeto Bambu**: introdução de espécies, manejo, caracterização e aplicações. Bauru: USP, 2012. 210 p.

SMOLE, M. S. ; HRIBERNIK, S. ; KLEINSCHEK, K. S. ; KREZE, T. Plant fibers for textile and technical applications. In: Grundas, S. & Stepniewski, A. (Ed.). **Advances in agrophysical research**. London: InTech. 2013. p. 369-397. DOI: 10.5772/52372.

TOMAZELLO FILHO, M.; AZZINI, A. Estrutura anatômica, dimensões das fibras e densidade básica de colmos de *Bambusavulgaris* SCHRAD. **Instituto de Pesquisas e Estudos Florestais**, n. 36, p. 43-50, 1987.

TOMAZELLO FILHO, M.; AZZINI, A. Variação e estrutura dos colmos de bambu (*Bambusa vulgaris*). **O Papel**, v. 69, p. 155-161, 1988.

WANG, X.; REN, H.; ZHANG, B.; FEI, B.; BURGERT, I. Cell wall structure and formation of maturing fibres of moso bamboo (*Phyllostachys pubescens*) increase buckling resistance. **Journal of the Royal Society Interface**, v. 9, p. 988-996, 2012. DOI: 10.1098/rsif.2011.0462.

YEASMIN, L.; ALI, N. GANTAIT, S.; CHAKRABORTY, S. Bamboo: an overview on its genetic diversity and characterization. **Biotech**, v. 201, n. 5, p. 1-11. 2014. DOI: 10.1007/s13205-014-0201-5.

Capítulo 2: PROPRIEDADES FÍSICAS E MECÂNICAS DE HASTES ADULTAS DE DIFERENTES ESPÉCIES DE BAMBU: UMA REVISÃO

Resumo - O bambu é uma planta com disseminação nacional, sendo utilizada para diversas finalidades, contudo, ainda existe uma carência de informações sobre suas propriedades físicas e mecânicas para indicação dos usos mais adequados. Desta forma, este estudo teve como objetivo realizar uma compilação dos dados disponíveis das propriedades físicas e mecânicas de hastes adultas de diferentes espécies de bambus. Constatou-se que existe variação dessas propriedades entre espécies e entre indivíduos de uma mesma espécie submetidos a diferentes condições de crescimento, ou de diferentes idades. Além disso, verificou-se propriedades distintas num mesmo indivíduo, dependendo da porção da haste em análise.

Palavras-chave: Cisalhamento; Compressão; Flexão; Massa específica; Tração.

Physical and mechanical properties of adult stems of different bamboo species: a review

Abstract - Bamboo is a plant with national dissemination, being used for several purposes, however, there is still a lack of information about its physical and mechanical properties to indicate the most appropriate uses. The objective of this study was to compile the available data on the physical and mechanical properties of adult stems of different species of bamboos. It was verified that there is variation of these properties between species and between individuals of the same species submitted to different growth conditions, or of different ages. In addition, distinct properties were found in the same individual, depending on the portion of the stems under analysis.

Keywords: Shearing; Compression; Bending; Specific mass; Traction.

Introdução

O maior interesse por materiais alternativos, principalmente nos últimos anos, se deve à intensificação com a preocupação socioambiental. Neste cenário, cada vez mais ganham espaço materiais renováveis e sustentáveis para uso no setor industrial, especialmente, se possibilitarem a redução de uso ou reutilização de recursos finitos. Uma alternativa econômica e ecológica é o uso dos bambus, por apresentarem propriedades físicas e mecânicas adequadas para diversos usos em diferentes setores industriais como, por exemplo, para produção de painéis.

O bambu apresenta potencial industrial, tanto pelo extrativismo em áreas naturais, quanto por meio da implantação de plantios homogêneos, apesar da significativa variação de produtividade por unidade de área. Para Hernández-Mena et al. (2014) podem ser produzidas

cerca de 30 ton.ha⁻¹.ano⁻¹ de biomassa, e para Lanna et al. (2014) a produção varia entre 20 e 60 ton.ha⁻¹.ano⁻¹, permitindo a industrialização de diferentes espécies. Por sua vez, Dias Júnior et al. (2014), enfatizaram que, para algumas espécies do gênero *Bambusa*, a produção pode variar entre 50 e 100 ton.ha⁻¹.ano⁻¹, dependendo das condições do local.

O bambu é uma planta difundida em todo território brasileiro, apresentando potencial para ser aproveitada, como já ocorre em diversos países, especialmente na Ásia (China, Índia, Tailândia, etc.), na América Central (Costa Rica e Honduras) e América do Sul (Peru, Equador e Colômbia), em que seu uso é tradicional (DFRS, 2011; SILVEIRA et al., 2017). Estimativas apontam que o bambu possua mais de três mil finalidades, desde alimentação (tanto humana como em forragem para animais), material de construção civil e de artesanato, energia e matéria-prima industrial em diversos produtos, entre os quais, destaca-se o etanol (KUTTIRAJA et al., 2013), compósitos (CHAOWANA, 2013), têxteis (NAYAK; MISHRA, 2016), uso energético da biomassa *in natura* e produção de carvão (BADUINO JUNIOR et al., 2016) e painéis (LIU et al., 2016).

O bambu apresenta diversas espécies com potencial industrial não só por apresentarem rápido crescimento, mas também por mostrarem satisfatórias características físico-mecânicas. Além disso, diversos aspectos morfológicos podem ser destacados, como espessura da parede, diâmetro, comprimento das hastes e linearidade longitudinal do colmo, aliados a uma elevada produtividade em biomassa, características que demonstram o seu potencial para utilizações industriais (OSTAPIV, 2011).

Desta forma, a incompleta caracterização das propriedades físicas e mecânicas é a maior justificativa para a reduzida utilização industrial do bambu, apesar de seu potencial (PEREIRA; BERALDO, 2007). O bambu é uma planta utilizada há milênios pela humanidade (PEREIRA, 2012), constituindo um importante material alternativo, com elevado potencial para geração de trabalho e renda nos países que o processam e o utilizam. Neste contexto, conhecer suas propriedades físicas e mecânicas é fundamental para compreender as peculiaridades de cada espécie, permitindo sua classificação e identificação do uso mais adequado.

As propriedades físicas e mecânicas do bambu estão correlacionadas com as anatômicas e químicas (LIESE, 1998; LOPEZ, 2003). Desta forma, um aspecto que interfere nas propriedades físicas e mecânicas do bambu, se deve às variações nos teores de fibra e parênquima, tanto no sentido longitudinal como transversal, além da espessura da parede ao longo das hastes. Em função disso, é fundamental considerar que suas propriedades são variáveis de um extremo a outro, podendo interferir no uso do material (SALAMON, 2009).

As propriedades do bambu, muitas vezes, são comparadas com as de outros materiais semelhantes, como a madeira, apresentando características adequadas para inúmeros usos. Por outro lado, também são influenciadas pelo teor de umidade, idade, densidade do colmo e, principalmente, pelo teor de fibras, o principal elemento responsável pela sua resistência (JANSSEN, 2000). Em virtude do exposto, o objetivo deste estudo foi realizar uma compilação de dados da literatura para caracterizar as propriedades físicas e mecânicas de diferentes espécies de bambu.

Caracterização física e anatômica dos colmos de bambu

O bambu destaca-se no reino vegetal, por possuir alta produtividade, com excelente relação entre sua massa específica e resistência mecânica, num formato geométrico circular oco, único e estruturalmente estável (GHAVAMI, 1989; MOREIRA; GHAVAMI, 1995). Ao contrário das espécies arbóreas, a estrutura anatômica dos colmos não apresenta grande diferenciação, sendo classificada como ‘simples’, porém, existem usos mais adequados e específicos entre as diferentes espécies (LIESE, 1980 e 1998; LIESE; TANG, 2015).

A principal diferença anatômica entre o bambu e a madeira é a ausência dos raios, sendo que seus elementos são todos longitudinais, possibilitando somente crescimento em altura de forma bastante rápida. Contudo, um aspecto que influencia na definição do uso mais adequado para uma determinada espécie se relaciona às suas propriedades mecânicas, em geral estabelecidas pela espessura de sua parede, dimensões de seus elementos e percentuais de células parenquimáticas e de fibras (AZZINI; SALGADO, 1982; NAYAK; MISHRA, 2016).

A compreensão da estrutura anatômica do colmo é fundamental para o entendimento das propriedades físicas e mecânicas do bambu (LÓPEZ, 2003), permitindo avaliar a possibilidade de sua utilização em diferentes produtos e processos produtivos. O bambu apresenta excelentes propriedades mecânicas, influenciadas pela idade do colmo (BAI, 1996), disposição e espessura da parede (NOGUEIRA, 2008), além do teor de fibras, descrito como o principal elemento responsável pelas propriedades de resistência. Outra variável fundamental é o teor de umidade, que interfere na densidade aparente do material (JANSSEN, 2000; LÓPEZ, 2003).

Os percentuais dos elementos constituintes do colmo de bambu (parênquima, fibras e células condutoras) mostram um padrão definido. Em geral, o tecido é formado por aproximadamente 50% de células de parênquima, 10% de tecidos condutores e 40% de feixes de fibras, sendo que a fibra exerce a função de sustentação na planta, concentrando-se nas proporções de 10% na área interna do colmo e 60% na região próxima à casca (LIESE, 1980, 1985, 1992 e 1998; PEREIRA; BERALDO, 2007). O parênquima e as células condutoras são

mais freqüentes no terço interno da parede do bambu, enquanto que no terço externo (córtex) a porcentagem de fibras é superior (TOMAZELLO; AZZINI, 1988). Além disso, sua parte externa é constituída de células epidérmicas, cobertas com uma camada cerosa, que impedem a perda de umidade (CHAOWANA, 2013; NAYAK; MISHRA, 2016).

As fibras são esbeltas, longas, afiladas e estão alinhadas na direção longitudinal do colmo (NAYAK e MISHRA, 2016). Estão presentes nas extremidades dos feixes vasculares (floema e vasos de metaxilema) constituindo um tecido de proteção com 60 a 70% da massa total e 40 a 50% da área total dos tecidos constituintes (LIESE, 1980; PEREIRA; BERALDO, 2007; NAYAK; MISHRA, 2016). As fibras compõem o chamado tecido mecânico da planta, com a função essencial de dar resistência ao colmo (NOGUEIRA, 2008).

A densidade de fibras varia ao longo da haste de bambu, em função da espécie, teor de umidade, idade do colmo e posição da amostra (base, meio e topo). No sentido transversal, aumenta da parte interna para externa, devido a maior concentração de feixes de fibras na porção exterior da parede do colmo, proporcionando coloração mais escura e conferindo maior resistência, enquanto que o parênquima e as células condutoras são abundantes na parte interna (JANSSEN, 2000).

Com relação ao sentido vertical, a densidade aumenta de baixo para cima, com o teor de parênquima diminuindo. Contudo, no topo do bambu, a variação no tamanho, quantidade e distribuição dos feixes de fibras se apresenta menor, em virtude do aumento da densidade na parte interna da parede da haste, resultante da redução do teor de células de parênquima e aumento dos feixes de fibras (LIESE, 1980 e 1985; PEREIRA, 2001; CHAOWANA, 2013; LIESE; TANG, 2015). Desta forma, a prática comum de não utilizar a porção superior das hastes pode ser considerado um desperdício, no que diz respeito ao teor de celulose.

As dimensões das fibras do bambu variam no interior do colmo. Num contexto geral, no sentido transversal, o máximo comprimento ocorre na faixa central, diminui nas extremidades, sendo que, na zona interna do colmo tendem a ser de 20 até 40% mais curtas (PEREIRA; BERALDO, 2007). Contudo, a variação mais significativa (superior a 100%) ocorre no sentido longitudinal de um entrenó: as fibras mais curtas estão sempre próximas aos nós, as mais longas na parte média (LIESE, 1980; PEREIRA; BERALDO, 2007). Outro aspecto relevante é a pequena redução no comprimento da fibra, com o aumento da altura do colmo avaliado.

A variação das dimensões das fibras não ocorre somente em virtude de sua posição em altura, mas também dentro de uma mesma espécie e entre diferentes espécies. Esta variação, tanto em comprimento como em espessura, pode reduzir ou aumentar a resistência mecânica do indivíduo (LIESE, 1980; PEREIRA; BERALDO, 2007; PEREIRA, 2012; BRITO et al., 2015;

LIESE; TANG 2015). Num contexto geral, as fibras apresentam parede celular espessa e estão incorporadas em uma matriz de lignina (GHAVAMI; MARINHO, 2003). Na estrutura da parede celular, as fibras mais curtas retêm sua atividade citoplasmática permanecendo não-lignificadas por longo período de tempo, mesmo em colmos maduros, enquanto que as mais longas se tornam gradualmente lignificadas com o envelhecimento do indivíduo (NAYAK; MISHRA, 2016).

A instabilidade dimensional que ocorre na madeira também é constatada no bambu, em virtude dos feixes fibrovasculares incorporados no tecido parenquimático adsorverem água até atingirem a umidade de equilíbrio com o ambiente (NAYAK; MISHRA, 2016). No nó do colmo (seção transversal), os numerosos feixes fibrovasculares, envoltos por células de parênquima ricas em substâncias de reserva na forma de amido (BRITO et al., 2015), sofrem variação na sua organização (TOMAZELLO; AZZINI, 1988). Na região dos entrenós, estes feixes fibrovasculares são constituídos por elementos de vaso de metaxilema, floema, bainha de fibras de protoxilema e, dependendo da espécie, de feixes de fibras adicionais (LIESE, 1998).

O colmo em condição seca apresenta maior resistência mecânica do que quando verde (MORITA, 2011), resistindo mais à tração do que à compressão, devido à orientação das fibras serem paralelas ao eixo do colmo (PEREIRA, 2001). Neste contexto, constata-se a importância da relação estrutura anatômica *versus* teor de umidade, já que a adsorção ou a liberação de água provoca alterações na estrutura anatômica e na densidade do material. No processo de secagem, a variação dimensional (inchamento ou contração) dos colmos de bambu é influenciada pela presença ou ausência de nós no material, isto em virtude da região dos entrenós serem maiores do que a região dos nós. Esse processo é desencadeado por aspectos físicos, como a variação no teor de umidade ou temperatura, estimulando a formação de fissuras no material (OSTAPIV, 2011).

A densidade dos entrenós é menor do que a dos nós, porém sua resistência à tração, flexão, compressão e cisalhamento é maior, isto se deve a ocorrência de bifurcações dos feixes fibrovasculares na região nodal. A variação nas propriedades de resistência do colmo é mais acentuada na direção radial do que na direção axial. Contudo, com a diminuição da espessura da parede da haste, da base em direção ao topo do colmo, ocorre aumento na resistência mecânica, em especial nas paredes internas, enquanto nas externas esta característica praticamente não se altera (LIESE, 1985 e 1998).

Além de variações de densidade e nas dimensões das fibras (comprimento, largura total, espessura de parede e diâmetro do lúmen), existem diferenças de porcentagens de seus elementos entre as espécies, aspectos que influenciam nas suas propriedades físico-mecânicas. Em geral, morfologicamente, as fibras caracterizam-se por serem longas, finas e com as paredes celulares grossas, com predominância de lumens estreitos, conferindo maior

resistência da celulose ao rasgo, ao passo que fibras de lúmen largo conferem maior resistência à tração e ao arrebentamento (AZZINI; SALGADO, 1982).

Propriedades físicas e mecânicas do bambu

Um aspecto que dificulta o aprofundamento do conhecimento a respeito do bambu refere-se à ausência de normas técnicas para realização de ensaios, visando estabelecer suas propriedades físicas e mecânicas (GHAVAMI, 1989; BERALDO; ZOULALIAN, 1995; LIESE, 2000; LÓPEZ, 2003; PEREIRA; BERALDO, 2007). A falta de padronização faz com que cada pesquisador adote sua própria metodologia, tornando difícil comparar os resultados obtidos. Neste contexto, a Rede Brasileira do Bambu discute atualmente, sob a liderança do professor Dr. Normando Perazzo Barbosa, a elaboração de uma norma brasileira, para a utilização estrutural do bambu em construções.

Apesar disso, estudos sobre as propriedades físicas do bambu, enfatizam sua semelhança com a madeira, sendo ambos materiais higroscópicos, ou seja, com capacidade de absorver ou perder umidade até atingir o ponto de equilíbrio com o ambiente (DE VOS, 2010; LIESE; TANG, 2015). No caso da adsorção d'água, denominada higroscópica ou de impregnação, ocorre aumento de peso e de volume (inchamento), até atingir seu ponto de saturação das fibras (PSF). A partir do PSF, a absorção da água, denominada livre ou capilar, provoca aumento somente de peso, ocupando as cavidades, principalmente o lúmen celular.

Pesquisas com bambu enfatizam que seu PSF varia entre 17 e 25%, influenciado pela composição e quantidade de constituintes químicos (SHARMA, 1988; HAMDAN et al., 2007). Contudo, por apresentar baixo teor de extratíveis hidrofóbicos, o intervalo mais adequado seria entre 28 e 32%, semelhante ao verificado em madeiras. A variação do teor de umidade no bambu afeta diferentes propriedades físicas e mecânicas, interferindo na sua resistência e densidade, além da durabilidade, trabalhabilidade e tenacidade (LIESE; TANG, 2015).

No momento do corte do bambu, o teor de umidade em geral é elevado, sendo que para a espécie *Phyllostachys pubescens* Mazel ex H. de Lehaie, Berndsen et al. (2010) constataram teor de umidade médio de 90,71; 75,15 e 60,40 %, respectivamente para 1, 3 e 5 anos de idade. Devido à maior espessura da parede e maior presença de células parenquimáticas altamente higroscópicas, a região da base apresenta teor de umidade mais elevado do que as demais regiões (meio ou topo). De uma forma geral, o processo de secagem do bambu é mais lento que nas madeiras com a mesma densidade, isto em virtude da limitada perda de umidade no sentido transversal às fibras, provocada pela impermeabilidade natural

produzida pela sua casca, além da falta de raios e pela existência de somente canais axiais (tecido condutor), permitindo tão-somente a eliminação de água no sentido axial.

Para Liese e Tang (2015), os colmos com idade inferior a 1 ano, apresentam teor de umidade variando entre 120 e 130%, tanto na base como no topo. Apresenta nos nós, percentuais até 25% inferiores aos entrenós, especialmente na base do colmo. Os maduros, com idade entre 3 e 4 anos, apresentam os maiores teores de umidade na base do colmo. No sentido transversal da parede do colmo, o teor de umidade é mais elevado na parte interna.

Além disso, no interior de um colmo, ocorre variação no teor de umidade em função da idade do material (em imaturos é maior), da época de colheita (podendo dobrar na estação chuvosa) e das variações resultantes da própria espécie (quantidade de células de parênquima). Contudo, a variação devido à época de colheita é maior do que as diferenças entre base e topo, bem como entre espécies.

A importância de se conhecer a variação no teor de umidade do bambu, se deve à variação dimensional de seus planos anatômicos (transversal e longitudinal). Afinal, o bambu não apresenta células ou estruturas orientadas radialmente, em virtude disso, sua variação dimensional transversal é única, variando somente se pertencente a zona interna ou externa da haste. Nas espécies arbóreas, o sentido transversal da madeira, apresenta os planos anatômicos radiais e tangenciais, sendo a variação dimensional no sentido tangencial quase o dobro da direção radial.

O bambu, semelhante à madeira, apresenta variação dimensional praticamente desprezível (inferior a 1%), na direção axial. No sentido transversal, é maior nas partes externas da parede do bambu, tanto que aparentemente determina este processo, provavelmente por apresentar maior densidade (LIESE; TANG, 2015). A variação dimensional dos bambus maduros é menor que dos imaturos, sendo que durante sua secagem, é um aspecto que merece atenção, pois ocorre de forma diferente do que na maioria das espécies de madeira.

No bambu, com a redução do teor de umidade ocorre um colapso das células, devido às forças capilares, isto resulta na diminuição da espessura de sua parede celular e do diâmetro celular. O colapso pode também resultar em contração aparente mas que não ocorre de forma contínua. Entre 40 e 70% de teor de umidade não ocorre contração, em virtude das células não estarem totalmente saturadas. Contudo, quando o teor médio de umidade é bastante elevado (acima de 70%) ou inferior ao PSF ocorre contração, no primeiro caso devido à perda de água higroscópica e no segundo caso, devido ao colapso celular (LIESE; TANG, 2015). Por isso, para um aproveitamento mais eficiente do bambu, é fundamental analisar sua estabilidade dimensional, definindo sua melhor utilização industrial.

Para que o bambu tenha todo seu potencial explorado como material é preciso conhecer seus dados de resistência, porém, não foram desenvolvidas metodologias universalmente aceitas. Apesar disso, os estudos desenvolvidos reforçam que os bambus possuem excelentes propriedades físicas e mecânicas, apresentando similaridade com diversas espécies de madeiras, apesar de sua estrutura anatômica não apresentar câmbio vascular secundário, ou seja, crescimento espessante com o passar do tempo (WANG et al., 2012). Nas diferentes espécies, sua estrutura anatômica é influenciada pela quantidade e distribuição de fibras ao redor dos feixes vasculares, que altera sua densidade.

No Brasil, um estudo de referência que estabeleceu orientações técnicas para o manejo, utilização e caracterização das propriedades físicas e mecânicas do bambu, ocorreu de um convênio entre o Instituto Agrônomo do Estado de São Paulo e o Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social (BNDES), que identificou a variação de 0,451 até 0,780 g.cm⁻³ na densidade básica de um conjunto de espécies, sendo esta variação similar a espécies de madeira de média densidade, consideradas tradicionalmente como de boas propriedades mecânicas. Os valores de massa específica básica do bambu, em geral, apresentam acréscimo no sentido base-topo, devido à redução gradual das células parenquimáticas em oposição ao aumento da concentração dos feixes fibrovasculares (BRITO et al., 1987).

Considerando médias gerais, Azzini e Ciamello (1971) aferiram para o gênero *Bambusa*, valores de densidade básica variando de 0,620 a 0,780 g.cm⁻³; respectivamente para as espécies *B. tuldoides* e *B. dissimulator*, sendo que Azzini e Salgado (1982) constataram o valor mínimo de 0,608 g.cm⁻³ para a espécie *B. oldhamii*. Para o gênero *Dendrocalamus*, as espécies *D. asper*, *D. strictus* e *D. latiflorus*, apresentaram valores de 0,599; 0,667 e 0,683 g.cm⁻³, respectivamente (CIAMELLO; AZZINI, 1971). Já para o gênero *Guadua*, variação de 0,451 a 0,654 g.cm⁻³; respectivamente para as espécies *G. angustifolia* e *G. amplexifolia*, (AZZINI et al., 1977). Para a espécie *Phyllostachys pubescens*, Berndsen et al. (2010) constataram densidade básica média de 0,60; 0,67 e 0,76 g.cm⁻³, para um, três e cinco anos de idade, respectivamente.

A resistência mecânica do bambu é influenciada, principalmente, pelo teor de fibras, sendo que seu valor máximo ocorre com a maturidade, a partir dos três anos de idade, sendo que até os seis anos ocorre aumento na resistência à tração e à compressão, e até oito anos na resistência à flexão. Posteriormente, ocorre diminuição de todas estas propriedades (PEREIRA, 2001). Ao analisar as propriedades mecânicas do bambu deve-se considerar que a resistência, tanto à tração como à compressão, decrescem da parte externa para a interna,

devido à menor quantidade de fibras, portanto, a região de menor resistência é o terço interno da parede do colmo, enquanto que no terço externo ocorre a porção mais resistente.

Em geral, no sentido longitudinal, o terço inferior é menos resistente em compressão e flexão do que a porção mediana e superior. Na parte central, constata-se maior resistência em tração, provavelmente, em virtude da menor quantidade de nós, já que os entrenós são mais longos nesta região. Na porção basal, ocorre maior teor de parênquima (reduzindo proporcionalmente o teor de fibras), constatando-se os menores valores de propriedades de resistência mecânica (LÓPEZ, 2003; PADOVAN, 2010).

No campo de atuação da engenharia florestal, algumas das propriedades mecânicas de interesse são: resistência à tração paralela, resistência à compressão paralela, flexão e cisalhamento. Na Tabela 1 estão apresentados os valores das propriedades mecânicas de bambus *in natura* de diferentes espécies, considerando diferentes metodologias de avaliação e autores.

Tabela 1. Resistência mecânica de algumas espécies de bambu.

Espécie	RT (MPa)	RC (MPa)	MOR (MPa)	RCis. (MPa)
<i>Bambusa arundinacea</i> ²	297	34	76	9,5
<i>Bambusa balcoa</i> ^{2 e 5}	-	45	-	-
<i>Bambusa multiplex</i> ^{2 e 5}	103	27	75	56
<i>Bambusa nutans</i> ⁷	132	47	60	-
<i>Bambusa oldhami</i> ⁷	126	72	-	-
<i>Bambusa tulda</i> ⁷	160	75	-	-
<i>Bambusa tuldoides</i> ^{2 e 5}	111	34	93	54
<i>Bambusa vulgaris</i> ^{2 e 5}	82	27	78	41
<i>Bambusa vulgaris</i> ⁵	317	28	90	8,5
<i>Bambusa vulgaris</i> Scharad ^{2 e 5}	149	46	124	41
<i>Dendrocalamus asper</i> ^{2 e 5}	285	28	89	6,6
<i>Dendrocalamus giganteus</i> ^{2 e 5}	135	40	108	46
<i>Dendrocalamus giganteus</i> ⁴	125,05	41,74	-	-
<i>Dendrocalamus strictus</i> ⁶	186	55,5	91,5	-
<i>Gigantochloa apus</i> ^{2 e 5}	296	30	84	7,2
<i>Gigantochloa atter</i> ^{2 e 5}	288	31	97	8,2
<i>Gigantochloa verticillata</i> ²	237	29	82	8,0
<i>Guadua angustifolia</i> ⁴	86,96	29,48	-	-
<i>Guadua atter</i> ^{2 e 5}	288	31	97	8,2
<i>Guadua superba</i> ²	130	42	102	48
<i>Guadua verticillata</i> ^{2 e 5}	237	29	82	8,0
<i>Phyllostachys bambusoides</i> ²	120	42	-	-
<i>Phyllostachys pubescens</i> ³	163	64	159	-

Fonte: Elaborado pelo autor, baseado em Salgado *et al.* (1994)¹, Pereira (2001)²; Berndsen (2008)³; Ghavami e Marinho (2005)⁴; Pereira (2012)⁵; Soares (2013)⁶; Carbonari *et al.* (2017)⁷. RT = resistência à tração; RC = resistência à compressão; MOR = módulo de ruptura (flexão estática); RCis. = resistência ao cisalhamento.

Os valores médios de tração, compressão, flexão estática e cisalhamento foram respectivamente de 184,27; 40,34; 93,38 e 25,01 MPa. Para tração, tanto o maior como o menor valor ocorreram para a mesma espécie (*B. vulgaris*), dependendo do autor. Para compressão, tanto o maior como o menor valor foram do gênero *Bambusa* (*B. vulgaris* e *B. tulda*), variando entre 27 e 75 MPa. Para flexão, a variação foi de 60 a 159 MPa, nas espécies *Bambusa nutans* e *Phyllostachys pubescens*, respectivamente. Para cisalhamento, o menor valor ocorreu para a espécie *Dendrocalamus asper*, com 6,6 MPa e a maior foi 56 MPa, para a espécie *Bambusa multiplex*, contudo, as espécies *B. tuldoides*, *B. vulgaris*, *Dendrocalamus giganteus* e *Guadua superba*, apresentaram valores elevados de cisalhamento, respectivamente 54, 41, 46 e 48 MPa, em comparação a valores inferiores a 10 MPa das demais espécies analisadas.

Em comparação às exigências estabelecidas para as estruturas de madeira descritas na NBR 7190 (ABNT, 1997), tanto para resistência a compressão como para cisalhamento, os valores constatados para maioria das espécies de bambu avaliadas apresentaram-se superiores a classe C30 de coníferas e de folhosas. As espécies *Bambusa oldhami* e *Bambusa tulda*, superaram a resistência à compressão da classe C60 para folhosas.

A resistência à compressão do bambu foi em todos os estudos superior a 25 MPa, valor mínimo estabelecido para a compressão do concreto tradicional, sendo em alguns casos maior que 40 MPa, que é o valor médio máximo verificado (NEVILLE, 2013). Para tração, os valores variaram entre 82 e 317 MPa, tendo para algumas espécies valores próximos à do aço de baixo a médio carbono, que varia entre 390 e 490 MPa (PANNONI, sd.) ou, especificamente, de 400 MPa, conforme ensaio de Carbonari et al. (2017).

Constatou-se que existem diferenças entre a região do nó e do entrenó, no interior dos colmos inteiros de bambu. Nos nós, a resistência à tração, flexão, compressão e cisalhamento é menor que nos entrenós, devido à descontinuidade da seção e aos desvios dos feixes de fibras. No entrenó, a resistência é menor na região mais próxima do nó do que no restante da região central, que apresenta fibras mais longas e mais resistentes (LÓPEZ, 2003; PADOVAN, 2010).

Quanto ao módulo de elasticidade, na literatura foi citado que ocorre variação em função da posição da amostra, sendo que no nó os valores são superiores devido à concentração de sílica, e no entrenó, na parte externa, os valores são superiores (GHAVAMI; MARINHO, 2001). Além disso, as fibrilas de celulose orientadas quase axialmente nas paredes das fibras maximizam o módulo de elasticidade longitudinal das fibras e a sua lignificação aumenta a rigidez transversal. Isso é interpretado como uma otimização estrutural e mecânica, que contribui para a alta resistência ao encurvamento do bambu (WANG et al., 2012).

A literatura recomenda para obtenção de maiores valores nos ensaios das propriedades mecânicas do bambu, que seja retirada uma fina camada, tanto em relação a face externa (epiderme) como a interna do colmo (CALEGARI et al., 2007). Isto, devido ao fato da primeira ser uma camada de casca (rica em sílica) e cera, que dificulta o processo de cozimento e desfibramento (no caso de painéis de fibras), sendo refratária aos adesivos (no caso de painéis laminados ou de partículas), dificultando a união e compactação (densificação) das fibras. Enquanto, que a face interna apresenta os septos transversais (diafragma do bambu) que é rica em amido, sendo uma camada de material com propriedades mecânicas inferiores às do restante do material (NOGUEIRA, 2008). Desta forma, estas camadas de material podem dificultar, e até inviabilizar a união e compactação das partículas, lâminas ou fibras, em painéis.

O material obtido, tanto de maiores alturas do colmo (maior teor de fibras), como de fibras com maiores espessuras de parede, se correlacionaram positivamente com o aumento da força de compressão, módulo de elasticidade (MOE) e o estresse ao limite proporcional, com a exceção para o módulo de ruptura (MOR) (LIESE e TANG, 2015). Além disso, a quantidade e a localização dos nós influenciaram sensivelmente os resultados obtidos.

Considerações finais

O bambu é uma planta difundida em todo território nacional, apresenta diversas espécies com potencial industrial não só por apresentarem rápido crescimento, mas também por mostrarem satisfatórias características físico-mecânicas, adequadas para inúmeros usos.

Verificou-se que o bambu apresentou propriedades físicas em parte semelhantes às da madeira, mas com algumas peculiaridades. A umidade média no momento do corte é elevada, variando de 60 a 130%, com valores superiores em indivíduos jovens. Nos maduros, com idade entre três e quatro anos, os maiores teores ocorrem na base do colmo. No sentido transversal da parede do colmo, o teor de umidade é mais elevado na parte interna, já para o longitudinal, na base.

A densidade média apresentou variação entre 0,451 e 0,780 g.cm⁻³ entre as espécies, estando na faixa das madeiras de média densidade. Com relação ao sentido vertical, aumenta de baixo para cima, com o teor de parênquima diminuindo. Já no sentido transversal, é maior na região próxima da casca. Nos entrenós é menor do que a dos nós, porém sua resistência à tração, flexão, compressão e cisalhamento é maior.

O bambu, semelhante à madeira, apresenta variação dimensional praticamente desprezível (inferior a 1%), na direção axial. No sentido transversal, é maior nas partes externas

da parede do bambu, tanto que aparentemente determina este processo, provavelmente por apresentar maior densidade. A variação dimensional dos bambus maduros é menor que dos imaturos, sendo que durante sua secagem, é um aspecto que merece atenção, pois ocorre de forma diferente do que na maioria das espécies de madeira. Nos bambus, a variação dimensional é influenciada pela presença ou ausência de nós no material, isto em virtude da região dos entrenós serem maiores do que a região dos nós, o que estimula a formação de fissuras no material.

A variação das dimensões das fibras não ocorre somente em virtude de sua posição em altura, mas também dentro de uma mesma espécie e entre diferentes espécies. Esta variação, tanto em comprimento como em espessura, pode reduzir ou aumentar a resistência mecânica do material. O teor máximo de fibras ocorre com a maturidade, a partir dos três anos de idade, sendo que até os seis anos ocorre aumento na resistência à tração e à compressão, e até oito anos na resistência à flexão. Posteriormente, ocorre diminuição de todas estas propriedades.

Ao analisar as propriedades mecânicas do bambu deve-se considerar que a resistência, tanto em tração como em compressão, decrescem da parte externa para a interna, devido à menor quantidade de fibras. No sentido longitudinal, o terço inferior é menos resistente em compressão e flexão do que a porção mediana e superior. Na parte central, constata-se maior resistência em tração, em virtude da menor quantidade de nós, já que os entrenós são mais longos nesta região. Na porção basal, por apresentar maior teor de parênquima (e menor de fibras), constata-se menores valores de propriedades de resistência mecânica.

Constata-se diferenças entre a região do nó e do entrenó. Nos nós, a resistência à tração, flexão, compressão e cisalhamento é menor que nos entrenós, devido à descontinuidade da seção e aos desvios dos feixes de fibras. No entrenó, a resistência é menor na região mais próxima do nó do que no restante da região central, por apresentar fibras mais longas e mais resistentes.

Agradecimentos

O presente trabalho foi realizado com o apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de financiamento 001.

Referências bibliográficas

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. NBR 7190: Projeto de estruturas de madeiras. Rio de Janeiro, 1997. 107 p.

AZZINI, A. & CIARAMELLO, D. Bambu como matéria-prima para papel. IV — Estudos sobre o emprêgo de cinco espécies de *Bambusa*, na produção de celulose sulfato. **Bragantia**, v. 30, n. 23, p. 305 - 319, 1971.

AZZINI, A.; CIARAMELLO, D.; NAGAI, V. Densidade básica e dimensões das fibras em bambus do gênero *Guadua*. **Bragantia**, v. 36, n. 1, p. I - V, 1977.

AZZINI, A.; SALGADO, A. Bambu e suas possibilidades industrial. **Congresso Anual da Associação Brasileira de Celulose e Papel**, São Paulo, 15, v. 1, p. 205-224, 1982.

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

BALDUINO JUNIOR, A. L. et al. Energetic potential of bamboo culms for industrial and domestic use in Southern Brazil. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.46, n.11, p.1963-1968, 2016. Doi: 10.1590/0103-8478cr20160233

BERALDO, A. L.; ZOULALIAN, A. Bambu: material alternativo para construções rurais. In: **Anais do V Encontro Brasileiro em Madeiras e Estruturas de Madeira [CD-ROM]**; 1995; Belo Horizonte. 1995.

BERNDSSEN, R. S.; KLITZKE, R. J.; BATISTA, D. C.; NASCIMENTO, E. M.; OSTAPIV, F. Propriedades físicas do bambu-mossô (*Phyllostachys pubescens* Mazel ex H. de Lehaie) em diferentes idades e posições do colmo. **Floresta**, v. 40, n. 1, p. 183-192, 2010.

BERNDSSEN, R. S. **Caracterização anatômica, física e mecânica de lâminas de bambu (*Phyllostachys pubescens*)**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica e de Materiais), Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2008. 98 p.

BRITO, J. O.; TOMAZELLO, M. F. O.; SALGADO, A. L. B. Produção e caracterização do carvão vegetal de espécies e variedades de bambu. **Scientia Forestalis**, v. 36, p. 13-17, 1987.

BRITO, F. M. S.; PAES, J. B.; OLIVEIRA, J. T. S.; ARANTES, M. D. C.; NETO, H. F. Caracterização Anatômica e Física do Bambu Gigante (*Dendrocalamus giganteus* Munro). **Floresta e Ambiente**; 22(4): 559-566, 2015.

CALEGARI, L.; HASELEIN, C. R.; SCARAVELLI, T. L.; SANTINI, E. J.; STANGERLIN, D. M.; GATTO, D. A.; TREVISAN, R. Desempenho Físico-Mecânico de painéis fabricados com bambu (*Bambusa vulgaris* Schr.) em combinação com madeira. **Cerne**, Lavras, v. 13, n.1, p. 57-63, jan/mar, 2007. Disponível em: < <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=74413108> >. Acesso em: 02/09/2015.

CARBONARI, G.; DA SILVA JUNIOR, N. M.; PEDROSA, N. H.; ABE, C. H.; SCHOLTZ, M. F.; ACOSTA, C. C. V.; CARBONARI, L. T. Bambu - o aço vegetal. **Mix Sustentável**, Ed5, v3, n1, p.17-25, 2017.

CHAWANA, P. Bamboo: an alternative raw material for wood and wood-based composites. **Journal of Materials Science Research**, v. 2, n. 2, p. 90-102, 2013. DOI: 10.5539/jmsr.v.2n2p90

CIARAMELLO, D. & AZZINI, A. Bambu como matéria-prima para papel. V - Estudos sobre o emprêgo de quatro espécies de *Dendrocalamus*, na produção de celulose sulfato. **Bragantia**, v. 30, n. 24, p. 321 - 336, 1971.

DE VOS, V. **Bamboo material properties and market perspectives**. Thesis report of Larenstein University, p. 19-48, 2010.

DFRS. **Market Development of Bamboo and Rattan Products with Potential Project**. Babarmahal, Nepal: Department of Forest Research and Survey, 2011. 66p.

DIAS JÚNIOR, A. F.; ANDRADE, A. M.; COSTA JÚNIOR, D. S. Caracterização de briquetes produzidos com resíduos agroflorestais. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 34, n. 79, p. 225-234, 2014. doi: 10.4336/2014.pfb.34.79.613.

GHAVAMI, K. **Application of bamboo as a low-cost energy material in civil engineering**. Third CIB-RILEM Symposium on Material for Low Income Housing. Cidade do México, México, p.526-536,1989.

GHAVAMI, K.; MARINHO, A. B. **Determinação das propriedades dos bambus das espécies: mosó, matake, *Guadua angustifolia*, *Guadua tigoara* e *Dencrocalamus giganteus* para utilização na engenharia**. Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. 2001. 40 p.

GHAVAMI, K.; MARINHO, A.B. Propriedades Geométricas e Mecânicas de Colmos dos Bambus para Aplicações em Construções. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 23, n.3 p.415-424, 2003.

GHAVAMI, K. & MARINHO, A. B. Propriedades físicas e mecânicas do colmo inteiro do bambu da espécie *Guadua angustifolia*. **Revista Brasileira de engenharia agrícola e ambiental**, v. 9, n. 1, Grande, 2005. <http://dx.doi.org/10.1590/S1415-43662005000100016>

HAMDAN, H.; HILL, C. A. S.; ZAIDON, A.; ANWAR, U. M. K.; LATIF, A. M. Equilibrium moisture content and volumetric changes of *Gigantochloa scortechinii*. **Journal Tropical Forest Science**, v. 19, n. 1, p. 18-24, 2007.

HERNÁNDEZ-MENA, L.; PÉCORAA, A. A. B.; BERALDO, A. L. Slow pyrolysis of bamboo biomass: analysis of biochar properties. **Chemical Engineering Transactions**, n. 37, p. 115-120, 2014. DOI: 10.3303/CET1437020

JANSSEN, J. J. A. **Designing and building with bamboo**. In: international network for bamboo and rattan (INBAR). Technical report. n. 20, Beijing, China, 2000. Disponível em: < http://www.fundeguadua.org/imagenes/DESARROLLOS%20TECNOLOGICOS/ARTICULOS%20Y%20PUBLICACIONES/INBAR_Technical_Report_No20.pdf >.

KUTTIRAJA, M.; SINDHUI, R.; VARGHESE, E.; SANDHYA, V. Bioethanol production from bamboo (*Dendrocalamus* sp.) process waste. **Biomass and bioenergy**, n. 59, p. 142-150, 2013. Doi: 10.1016/j.biombioe.2013.10.015

LANNA, S. L. de B.; DELGADO, P. S.; AYRES, E.; LAGO, R. M. Eco-design: a eficiência de produtos feitos de Bambu para o sequestro de carbono. **Estudos em Design**, v. 22, n. 1, p. 146-156, 2014.

LIESE, W. Anatomy of Bamboo. In: LESSARD, G. CHOUINARD, A. Bamboo research in Asia: proceedings of a workshop held in Singapore. **IDRC** [International Union of Forestry Research Organizations], Ottawa, CA, 1980. 228 p.

LIESE, W. Anatomy and Properties of Bamboo, p. 196-208. In: **Bamboos - Biology, Silvics, Properties, Utilization, GTZ**, Hamburg, Republic of Germany, 1985.

LIESE, W. **The structure of bamboo in relation to its properties and utilization**. Proceedings of the International Symposium on Industrial Use of Bamboo. Beijing, China, p. 96-100, 1992.

LIESE, W. The anatomy of bamboo culms. **International Network of Bamboo and Rattan (INBAR)**, Technical Report, 18, Beijing, China, 1998. 208 p.

LIESE, W.; TANG, T. K. H. Properties of the bamboo culm. In: LIESE, W.; KOHL, M. (Eds.), **Tropical forestry, bamboo: the plant and its uses**, p. 227–256. Switzerland: Springer International Publishing. 2015. doi:10.1007/978-3-319-14-133-6_8

LIU, X.; SMITH, G. D.; JIANG, Z.; BOCK, M. C. D.; BOECK, F.; FRITH, O.; GATÓO, A.; LIU, K.; MULLIGAN, H.; SEMPLE, K. E.; SHARMA, B.; RAMAGE, M. Engineered bamboo nomenclature. **BioResources**, v. 11, n. 1, p. 1141-1161, 2016. Disponível em: <http://ojs.cnr.ncsu.edu/index.php/BioRes/article/view/BioRes_11_1_1141_Liu_Nomenclature_Engineered_Bamboo/4078>. Acesso em 19 de mai 2017.

LÓPEZ, O. H. **Bamboo: the gift of the God's**. D'vinni: Bogotá, Colômbia, 2003. 553 p.

MOREIRA, L.E.; GHAVAMI, K. Os méritos do bambu. **Informador das construções, pesquisa e prospecção**. Belo Horizonte, MG, p. 22-23,1995.

MORITA, B. de S. **Análise da estabilidade dimensional e resistência mecânica em bambu *Guadua angustifolia* pós-processos de tratamentos químicos e térmico**. Monografia em Engenharia Industrial Madeireira. Universidade Estadual Paulista “Julio de Mesquita Filho”, Itapeva, SP, 2011. 84 p.

NAYAK, L.; MISHRA, S. P. Prospect of bamboo as a renewable textile fiber, historical overview, labeling, controversies and regulation. **Fashion and Textiles**, v. 3, n. 2, p. 1-23, 2016, DOI: 10.1186/s40691-015-0054-5

NEVILLE, A. M. **Tecnologia do concreto**. 2. Ed, Porto Alegre: Bookman, 2013.

NOGUEIRA, C. de L. **Painel de bambu laminado colado estrutural**. 92 f. Dissertação (Mestrado em Recursos Florestais), Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2008.

OSTAPIV, F. **Resistência mecânica do material compósito: madeira de eucalipto-lâmina de bambu**. Tese (em Engenharia Mecânica), Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, SP, 2011. 148f.

PADOVAN, R. B. **O bambu na arquitetura: design de conexões estruturais**. Dissertação (Mestrado em Design), Unesp, Bauru, SP, 2010. 183 p.

PANNONI, F. D. **AÇOS ESTRUTURAIS**. sd. Denversa. Disponível em: <<http://www.denversa.com.br/site/files/produtos/ba34aa7ebb8e04f694a76c816cee0afc.pdf>>. Acesso em 16 de Jun 2017.

PEREIRA, M. A. R. **Bambu, espécies, características e aplicações**. São Paulo: UNESP – Campus Bauru, 2001.

PEREIRA; M. A. dos R. **Projeto Bambu**: introdução de espécies, manejo, caracterização e aplicações. Tese de Livre-Docente. USP, Bauru, SP, 2012. 210 p.

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

SALAMON, C. **Ensaio para viabilizar a laminação do bambu *Dendrocalamus giganteus* em operações de torneamento sem centros**. Tese (doutorado em Engenharia Mecânica na área de Materiais), Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2009. 113f.

SALGADO, A. L. B.; AZZINI, A.; CIARAMELLO, D.; MACEDO, E. L.; SALGADO, A. L. **Instruções técnicas sobre o bambu**. Boletim técnico (nº 143), Instituto Agrônomo de Campinas, 1994. 44 p.

SHARMA, S. N. Seasoning behavior and related properties of some Indian species of bamboo. **Indian Forest**, v. 114, n. 10, p. 613-621, 1988.

SILVEIRA, E. S. DA; ROEL, A. R.; BRITO, V. H. S.; PISTORI, H.; CEREDA, M. P. Influência de espécies de bambu como alimento no crescimento populacional e na preferência alimentar do caruncho-do-bambu. In: DRUMOND, P. M.; WIEDMAN, G. (Org). **Bambus no Brasil**: da biologia à tecnologia. 1. ed. - Rio de Janeiro: ICH, 2017. 130-144 p.

SOARES, S. F. B. de S. **ESTRUTURAS EM BAMBU**. Dissertação (Mestrado Integrado em Engenharia Civil – Especialização em Estruturas), Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2013. 130 p.

TOMAZELLO FILHO, M.; AZZINI, A. Variação e estrutura dos colmos de bambu (*Bambusa vulgaris*). **O Papel**, São Paulo, SP, V. 69, p. 155-161, 1988.

WANG, X.; REN, H.; ZHANG, B.; FEI, B.; BURGERT, I. Cell wall structure and formation of maturing fibres of moso bamboo (*Phyllostachys pubescens*) increase buckling resistance. **Journal of the Royal Society**, 9, 988–996, 2012. Doi: 10.1098/rsif.2011.0462

Capítulo 3: O POTENCIAL DE USO DO BAMBU PARA FINS ENERGÉTICOS: UMA REVISÃO

Resumo - A demanda crescente por energia estimula a pressão ambiental sobre as florestas, intensificando o processo de desmatamento. Para reverter este cenário é fundamental o desenvolvimento tecnológico de produtos sustentáveis para substituir as atuais alternativas. Neste contexto, o bambu se apresenta como uma matéria-prima versátil, renovável, de rápido crescimento, com elevada produtividade, baixo custo de manejo, além de excelente sequestrador de carbono, destacando-se como matéria-prima com potencial energético. Em virtude do exposto, o presente trabalho teve como objetivo descrever o potencial do uso do bambu para fins energéticos, por meio de uma revisão de literatura a respeito do processo de colheita e processamento de bambu adotado nos principais plantios comerciais e do seu uso para fins energéticos na forma de biomassa, briquetes, pellets e carvão vegetal.

Palavras-chave: Biomassa; Carvão vegetal; Pellets; Poder calorífico superior.

The potential for the use of bamboo for energy purposes: a review

Abstract - The growing demand for energy stimulates environmental pressure on forests, intensifying the process of deforestation. To reverse this scenario is essential the technological development of sustainable products to replace the current alternatives. In this context, bamboo presents itself as a versatile, renewable, fast-growing raw material with high productivity, low handling costs, and excellent carbon sequester, highlighting itself as a raw material with energy potential. The objective of this study was to describe the potential of the use of bamboo for energy purposes, through a review of the literature on the process of harvest and processing of bamboo adopted in the main commercial plantations and its use for purposes in the form of biomass, briquettes, pellets and charcoal.

Keywords: Biomass; Charcoal; Pellets; Higher calorific value.

Introdução

A demanda crescente por materiais, num contexto que permita reduzir a pressão ambiental gerada pelo processo de desmatamento, aliado ao desenvolvimento de novas tecnologias, estimula o interesse do mercado por novas alternativas de produtos sustentáveis (VIEIRA et al., 2012). Uma opção viável é o uso de bambu, por se apresentar como uma matéria-prima versátil, com diversos usos e aplicações, com rápida renovação e boas características físico-mecânicas,

considerado um recurso renovável, de rápido crescimento, elevada produtividade, baixo custo de manejo, além de excelente sequestrador de carbono (SUN et al., 2013; HERNÁNDEZ-MENA et al., 2014).

Um estudo temático visando a Avaliação Global dos Recursos Florestais 2005, da International Network for Bamboo and Rattan (INBAR), enfatiza que o número aproximado de espécies de bambu catalogadas no mundo é de 1200, em 90 gêneros (LOBOVIKOV et al., 2007). No Brasil existem 232 espécies nativas, sendo 134 endêmicas, além de 20 introduzidas. A área total coberta por bambu no mundo é de aproximadamente 36 milhões de hectares (CHAOWANA, 2013), sendo que o país com maior área é o Brasil, com 9.300.000 ha, seguido pela China e a Índia, com 5.712.000 e 5.476.000 ha, respectivamente (FAO, 2010).

A brotação do bambu ocorre uma vez por ano, sempre na mesma época, podendo gerar novos colmos, desde que encontrem espaço, luz e nutrientes suficientes (GUARNETTI; COELHO, 2014). Os colmos são constituídos por uma mistura de lignina e celulose, organizada em feixes de fibras, células parenquimatosas e vasos. Sua estrutura anatômica é modificada com sua maturidade, influenciando na variação de sua densidade aparente (BERNDSSEN et al., 2013), e estes aspectos interferem diretamente no potencial energético, entre outras aplicações.

O processo de colheita dos colmos de bambu, em geral, é semi mecanizado, utilizando motosserra. Nas espécies alastrantes o corte é rente ao chão, já para as entouceirantes é realizado 20 cm acima do solo, sendo para ambas, logo acima do primeiro nó (PEREIRA, 2012). O uso de motosserras apresenta vantagens como reduzido custo de aquisição, fácil manuseio em terrenos desfavoráveis, alta produtividade individual em relação aos métodos manuais, além de que é usada em todas as etapas da colheita como corte, traçamento e desgalhamento (MACHADO, 2014).

Entre os aspectos positivos da utilização de biomassa de bambu para fins energéticos, pode-se citar o fato de ser uma planta perene, que não necessita de replantio; gerar elevada produção de biomassa, em torno de 30 ton.ha⁻¹.ano⁻¹ (HERNÁNDEZ-MENA et al., 2014), dependendo da espécie e das condições edafoclimáticas. Dias Junior et al. (2014) informam que algumas espécies do gênero *Bambusa* apresentam produção que varia entre 50 e 100 ton.ha⁻¹.ano⁻¹, dependendo das condições do local, sendo considerada madura, geralmente, aos três anos. Também apresenta satisfatório poder calorífico, com valores comparáveis ao *Eucalyptus sp.*, que é a espécie florestal mais cultivada para esse fim nos plantios comerciais no Brasil.

Em virtude do exposto, este trabalho teve como objetivo descrever o processo de colheita e processamento adotado em plantios comerciais de bambu do país e suas aplicações e potencial de uso para fins energéticos, na forma de biomassa, briquete, pellet e carvão vegetal.

Colheita e processamento de bambu

Neste tópico foram descritos os processos de colheita e processamento da biomassa de bambu, em plantios comerciais identificados nesta pesquisa. Na análise destes sistemas, cabe enfatizar as seguintes semelhanças: a) adoção do sistema de corte raso semi-mecanizado; b) processamento em forma de cavaco, utilizando picadores florestais. Contudo, são percebidas particularidades nas operações realizadas nestes plantios comerciais.

No município de Santo Amaro, BA, o manejo da plantação de bambu iniciou no segundo semestre de 2005, numa área de três mil hectares. Neste sistema de colheita, os galhos e folhas permanecem na plantação e somente as hastes são transportadas para o pátio localizado nas proximidades da indústria, sendo picados na forma de cavaco e estocados por aproximadamente 20 dias para perder parte da umidade (até atingir aproximadamente 30%), para abastecer a caldeira da indústria. No ano de 2010, foram colhidos 70 ha por mês, com rendimento médio de 200 m³.ha⁻¹, sendo que o consumo médio na caldeira foi de 4,5 toneladas de cavaco (com 30% de umidade) por hora, tornando a empresa autossuficiente em energia para geração de vapor (GUARNETT; COELHO, 2014).

Também são cultivados mais de 30 mil hectares de bambu da espécie *Bambusa vulgaris* em dois plantios comerciais para fins industriais, um localizado no município de Jaboatão dos Guararapes, PE, e outro no município de Coelho Neto, MA. Nestes plantios os colmos são colhidos geralmente a cada dois anos e meio, permanecendo no campo por duas ou três semanas, até perderem todas as folhas e parte de sua umidade (GUARNETTI; COELHO 2014). Na Figura 1 são ilustradas as operações realizadas nestes plantios.



Figura 1. Descrição do processo de colheita, transporte e processamento de cavacos de bambu. A) Corte do bambu. B) Detalhamento do corte (rente ao solo). C) Carregamento dos bambus em carretão adaptado, tracionado por trator agrícola. D) Picador florestal para produção de cavacos.

Fonte: Adaptado de GRUPO JOÃO SANTOS (2007).

Considerando os processos citados, pode-se inferir que o Brasil, em virtude das extensas áreas cobertas por bambus, inclusive no interior da Amazônia, apresenta potencial para consolidar

uma ampla cadeia produtiva para fins energéticos. Além disso, empresas que utilizam plantios de bambu têm obtido incremento médio anual (IMA) superior a 30 toneladas por hectare. Para Escobar e Coelho (2014), o IMA em biomassa por hectare, para Eucalipto (ciclo tradicional), Eucalipto (ciclo curto) e Bambu, foi de respectivamente 20, 54 e 35 ton.ha⁻¹.ano⁻¹.

Ao utilizar os valores descritos por Hernández-Mena et al. (2014), de 30 ton.ha⁻¹.ano⁻¹ de biomassa de bambu e considerando o período de três anos para cada ciclo de corte, totalizaria 180 toneladas por hectare num período de seis anos. Considerando o valor médio de 4.396,5 kcal.kg⁻¹ relativo ao Poder Calorífico Superior (PCS) de diferentes espécies de bambu definido na Tabela 1, seriam obtidos neste período 3.31 GJ por hectare. Ao utilizar a densidade básica de 0,411 g.cm⁻³ e o valor médio de 4.617 kcal.kg⁻¹ do PCS, verificado para cinco espécies de *Eucalyptus* (JESUS et al., 2017), seria necessário produzir 417 m³ por hectare de madeira de *Eucalyptus*, para obter a mesma quantidade de energia, no mesmo período.

Contudo, é necessário focar não apenas no contexto da matéria-prima disponível, mas, prioritariamente, na inovação e capacitação tecnológica para utilizar todo o potencial deste material, a exemplo do que fazem muitos países que valorizam o bambu, como já ocorre na Colômbia, Equador, Japão, China, Índia, entre outros.

Características da biomassa de bambu para fins energéticos

O bambu, embora seja uma gramínea, possui um conjunto de características que o torna uma matéria-prima alternativa aos materiais lenhosos tradicionais, como as florestas plantadas de pinus e eucalipto, sendo capaz de fazer frente às demandas emergentes de diversos setores da indústria. Isto, em função de apresentar elevada produção de biomassa por hectare/ano, relativa facilidade de manuseio em corte raso, não necessitar de replantios por ser uma planta perene, possuir excelente adaptação edafoclimática à maioria das condições brasileiras e proporcionar poder calorífico comparável ao de espécies comumente utilizadas para fins energéticos.

Na utilização energética do bambu, como nos demais processos renováveis, a principal barreira constatada é de ordem econômica, em virtude das tecnologias empregadas ainda se encontrarem em processo de desenvolvimento, com custo de implantação elevado. Esse é o contexto relativo à utilização da biomassa de bambu para fins energéticos, pois até o presente momento não foi constatada a existência de trabalhos científicos que abordem barreiras a implantação desse sistema (GUARNETTI, 2013).

Na Tabela 1, foram compilados dados de trabalhos científicos que avaliaram a composição química e o PCS da biomassa de diferentes espécies de bambu e de *Eucalyptus urograndis*.

Tabela 1. Composição e o Poder Calorífico Superior da biomassa de espécies de bambu e *Eucalyptus urograndis*.

Espécie	Db (g.cm ⁻³)	Lignina (%)	Extrativos (%)	Voláteis (%)	Cinzas (%)	Carbono (%)	PCS (kcal.Kg ⁻¹)
<i>Bambusa tuldooides</i> ⁴	0,421	---	---	75,2	3,0	21,8	4.515,1
<i>B. vulgaris</i> ¹	0,624	25,76	16,26	82,25	2,49	15,26	4.571,0
<i>B. vulgaris</i> Var. Vittata ⁴	0,462	---	---	74,7	2,5	22,8	4.662,9
<i>Dendrocalamus asper</i> ⁴	0,604	---	---	75,0	2,1	23,0	4.526,2
<i>D. giganteus</i> ²	---	26,25	4,90	70,31	2,57	17,75	4.116,5
<i>D. latiflorus</i> ³	---	26,19	2,93	---	2,96	---	4.139,0
<i>Phyllostachys makinoi</i> ³	---	28,78	1,69	---	1,75	---	4.285,0
<i>P. pubescens</i> ³	---	28,80	4,30	---	1,73	---	4.356,0
Média bambu	0,527	27,16	6,02	75,49	2,39	20,12	4.396,5
<i>Eucalyptus urograndis</i> ⁴	0,482	27,5-30,2 ⁵	2,1-2,5 ⁵	82,2	0,3	17,5	4.657,6

Db = Densidade básica (g.cm⁻³); PCS = Poder Calorífico Superior (kcal.Kg⁻¹).

Fonte: ¹ Balduino Junior et al. (2016); ² Hernández-Mena et al. (2014); ³ Lin et al. (2016); ⁴ Santos et al. (2016); ⁵ Zanuncio et al. (2013).

Pode-se destacar que o bambu apresenta menor teor de voláteis e maiores teores de extrativos, cinza e de carbono fixo do que foi verificado na madeira de *Eucalyptus urograndis*.

Produção de briquetes e pellets de bambu para fins energéticos

O processo de briquetagem otimiza a combustão e favorece a produção de energia eficiente (ANTWI-BOASIAKO; ACHEAMPONG, 2016). O processo consiste em comprimir a biomassa, convertendo-a em um combustível processado e uniforme, que pode ser queimado como uma fonte energética. No Brasil, o setor dos briquetes e pellets ainda se encontra pouco desenvolvido, com reduzida escala de produção. Para a Associação Brasileira de Indústrias de Pellets, no ano de 2013, as fábricas em funcionamento produziram 62.000 toneladas, utilizando menos de 15% da capacidade total instalada de 425.750 toneladas por ano (ABIPEL, 2014).

O briquete e o pellet são produtos resultantes da compactação mecânica de coprodutos industriais, florestais ou agrícolas, com ou sem componente químico ou aglutinante no processo (GOUVÊA et al., 2017), se constituindo numa commodity no mercado de biomassa internacional. Este material é adequado para queima em caldeiras industriais, substituindo com eficiência o uso da lenha comum, o óleo combustível e o gás natural, sendo considerado o combustível sólido mais limpo do mercado, por ser associado à preservação ambiental, em virtude de aproveitar coprodutos em substituição à lenha e ao carvão vegetal. A Associação Brasileira das Indústrias de Pellets relata que no ano de 2014 existiam 13 fábricas em operação no Brasil, produzindo pellets essencialmente no sul e sudeste do país, em especial, nos estados de Santa Catarina, Paraná e São Paulo.

No ano de 2015, o Brasil era o 36º maior produtor de pellets do mundo, apesar de ser um dos maiores produtores mundiais de madeira serrada, gerando um volume considerável de coprodutos, descartados muitas vezes de forma inadequada. A produção de pellets no Brasil no ano de 2013 foi de 62.000 toneladas, passando para 75.000 toneladas em 2015, representando crescimento de quase 21% no período de dois anos. Para o ano de 2016, constatou-se um aumento superior a 80%, com a produção de 135.350 toneladas, possibilitando a exportação de 35.760 toneladas de pellets, ou seja, um pouco mais que 26% desta produção, contudo, ainda uma quantidade pouco representativa em escala global. No ano de 2014, a Itália foi o maior mercado brasileiro, com a exportação de 6.159 toneladas, representando 12,5% da produção e mais de 92% das exportações (FAO, 2018).

A conversão dos coprodutos da madeira de coníferas em pellets é tecnologicamente viável, e no Brasil existem mais de 1,6 milhão de hectares plantados de pinus (ABRAF, 2013), resultando em elevado volume de produtos secundários. Além disso, também existem os coprodutos gerados pela indústria madeireira brasileira de espécies folhosas. Contudo, estes são mais difíceis de serem transformadas em pellets, necessitando adaptação específica do processo e das máquinas de pelletização, no uso de agentes ligantes e matrizes mais resistentes.

Um aspecto que tem estimulado o aumento na produção de pellets no Brasil se relaciona à proibição, a partir de 2014, do descarte de coprodutos industriais sem tratamento, conforme definido na Política Nacional de Resíduos Sólidos (BRASIL, 2010). De forma indireta, esta legislação estimula o aproveitamento dos produtos secundários de atividades madeireiras, através da sua compactação mecânica visando à utilização para fins energéticos, não sendo permitido sua deposição direta em aterros.

Na Tabela 2 são apresentados os dados de produção, exportação, valor exportado e preço por tonelada de pellets no Brasil, no período entre 2013 e 2016.

Tabela 1. Parâmetros do mercado brasileiro de pellets.

Atividade	Ano			
	2013	2014	2015	2016
Produção (ton)	62000	49000	75000	135350
Exportação (ton)	194	6660	24368	35760
Exportação (1000 US\$)	48	1409	4361	5803
Cotação exportação (US\$.ton ⁻¹)	247,42	211,56	178,96	162,28

Fonte: FAO, 2018.

Com relação aos parâmetros do material produzido, na Tabela 3 são descritos os percentuais de teor de umidade, cinza e densidade a granel, além do Poder Calorífico Inferior (PCI) de pellets de madeira (*Pinus* e *Eucalipto*) e do bambu *Bambusa vulgaris*.

Tabela 3. Principais parâmetros na produção de pellets.

Tipo de pellets (material)	Umidade (%)	Teor de Cinzas (%)	PCI (kcal.kg ⁻¹)	Densidade a granel (kg.m ⁻³)
Madeira de <i>Pinus</i>	8,6	0,3	4228	640
Madeira de <i>Eucalipto</i>	8,3	0,5	4132	641
<i>Bambusa vulgaris</i>	6,9	1,9	4132	658

PCI = Poder Calorífico Inferior (kcal.Kg⁻¹).
 Fonte: Garcia (2014).

O bambu, devido ao seu satisfatório poder calorífico, quando comparado com as espécies mais usadas para fins energéticos, possibilita, além da produção de pellets, a fabricação de briquete. Este processo reduz impactos ambientais em áreas de floresta, devido à sua capacidade de crescimento e de produção de biomassa, desta forma, retendo carbono da atmosfera, se caracterizando como uma fonte renovável de energia. Na Tabela 4 são mostrados os teores médios de voláteis, cinzas e carbono fixo e o PCS, verificados em briquete de diferentes espécies de bambu.

Tabela 4. Composição de briquetes de diferentes espécies de bambu.

Espécie	Tv (%)	Tz (%)	Tcf (%)	PCS (kcal.kg ⁻¹)
<i>Bambusa vulgaris</i> ¹	82,2	2,5	15,3	4571
<i>Bambusa vulgaris</i> ²	74,7	2,5	22,8	4667
<i>Bambusa tuldoides</i> ²	75,2	3,0	21,8	4515
<i>Phyllostachys bambusoides</i> ¹	81,9	0,9	17,3	4694
<i>Phyllostachys edulis</i> ¹	80,6	0,4	19,0	4670
<i>Phyllostachys nigra</i> ¹	79,0	0,8	20,2	4716
<i>Phyllostachys aurea</i> ³	81,5	0,9	17,6	4404

Tv = Teor de voláteis (%); Tz = Teor de cinza (%); Tcf = Teor de carbono fixo (%); PCS = Poder Calorífico Superior (kcal.Kg⁻¹).
 Fonte: ¹ Brand et al. (2019); ¹ Sette Júnior et al. (2016); ¹ Sette Júnior et al. (2017).

O uso do bambu para produção de carvão vegetal

Estima-se que metade da biomassa lenhosa colhida no Brasil se destina para fins energéticos (HERNÁNDEZ-MENA et al., 2014). Além disso, nosso país é o maior produtor e consumidor mundial de carvão vegetal, utilizado principalmente para a produção de aço, ferro-gusa e ferro-ligas. Contudo, foi em virtude de uma combinação de regulamentação ambiental mais rígida e de aumento da fiscalização, que a maior parcela da produção passou a ser obtida de florestas plantadas, em especial de eucalipto (YAZDANI et al., 2012; NISGOSKI et al., 2014).

As pesquisas envolvendo carvão de bambu no Brasil, em sua maioria, foram desenvolvidas com *Bambusa tuldoides*, *Bambusa vulgaris*, *Bambusa vulgaris* var. *Vittata*, *Dendrocalamus asper* e *Dendrocalamus giganteus*, por meio do processo de carbonização em condições de laboratório. Os resultados destes estudos, foram comparados com a carbonização de amostras de *Eucalyptus urograndis*, sendo que os dados de temperatura do processo, densidade básica, rendimento gravimétrico, teor de voláteis, cinzas, carbono fixo e o PCS do carvão de diferentes espécies de bambu e de *Eucalyptus urograndis* são apresentados na Tabela 5.

Tabela 5. Composição do carvão de diferentes espécies de bambu e de *Eucalyptus urograndis*.

Espécie	T (°C)	Db (g.cm ⁻³)	RG (%)	Voláteis (%)	Cinzas (%)	Carbono (%)	PCS (kcal.Kg ⁻¹)
<i>Bambusa tuldoides</i> ³	550	0,32	34,1	21,7	6,1	72,3	6.752,1
<i>B. vulgaris</i> ¹	450	0,37	36,4	27,55	5,1	67,3	7.431,0
<i>B. vulgaris</i> Var. <i>Vittata</i> ³	550	0,34	34,7	23,6	3,0	73,4	6.776,7
<i>Dendrocalamus asper</i> ³	550	0,48	36,9	26,5	1,9	71,5	6.640,5
<i>D. giganteus</i> ²	500	---	---	8,10	3,9	81,5	7.372,0
Média	---	0,378	35,5	21,5	4,0	73,2	6.994,5
<i>Eucalyptus urograndis</i> ³	550	0,36	30,8	29,1	0,4	70,4	6.669,9

T = temperatura (°C); Db = Densidade básica (g.cm⁻³); RG = Rendimento Gravimétrico (%); PCS = Poder Calorífico Superior (kcal.Kg⁻¹).

Fonte: ¹ Balduino Junior et al. (2016); ² Hernández-Mena et al. (2014); ³ Santos et al. (2016).

Verifica-se que o bambu apresenta maior rendimento gravimétrico em carvão e teor de carbono fixo, mas menor de voláteis, isto possibilita a obtenção de carvão mais denso e com maior teor de cinzas após a queima, em relação ao de madeira (GUARNETTI, 2013). Diversos países orientais produzem o carvão de bambu com excelentes resultados energéticos, porém, no Brasil, ainda são poucas as iniciativas. Apesar disso, a utilização da biomassa de bambu na produção de carvão vegetal apresenta potencial, conforme mostrado na Tabela 6.

Tabela 6. Poder calorífico superior do carvão de algumas espécies de bambus e *Eucalyptus*.

MATERIAL	(kcal.kg ⁻¹)	Diferença (%) das espécies de bambu com:	
		<i>E. urophylla</i>	<i>E. saligna</i>
<i>Eucalyptus urophylla</i> (Híbrid).	8.487	---	---
<i>Eucalyptus saligna</i> (carbonização 800°C)	8.198	---	---
<i>Bambusa vulgaris</i> var. <i>vittata</i>	8.460	- 0,32	3,19
<i>Bambusa tuldoides</i>	7.922	- 6,66	- 3,37
<i>Bambusa vulgaris</i> sarch	7.785	- 8,27	- 5,04
<i>Dendrocalamus giganteus</i>	8.685	2,33	5,94
Média bambu	8.198	- 3,40	0,00

Fonte: Modificado de Brito et al. (1987).

O carvão de bambu da espécie *Bambusa vulgaris* var. *vittata* apresenta PCS superior ao verificado para *Eucalyptus saligna* e muito próximo ao identificado para a espécies *Eucalyptus urophylla* (Híbrid). Comparando as espécies de eucalipto com a média de todos os bambus analisados, constata-se que os bambus tiveram um PCS equivalente ao *E. saligna* e 3,40% inferior ao *E. uruphylla*, sendo que o *D. giganteus* apresentou valores de PCS superior ao verificado nas espécies de *Eucalyptus*.

Na Tabela 7 são apresentados os resultados correspondentes ao PCS do carvão vegetal produzido em temperatura de carbonização de 500 °C e seu rendimento (em %) nas temperaturas de 400, 500 e 600 °C.

Tabela 7. Poder Calorifico Superior e rendimento dos carvões vegetais produzidos com bambu.

Temperatura de carbonização por Tratamento	Rendimento (%) de carvão vegetal	PCS (Kcal.kg ⁻¹) do carvão vegetal
600 °C	27,2	--
Carvão vegetal 500 °C	37,9	7.372
400 °C	45,4	--

Fonte: Hernández-Mena et al. (2014).

Para Vieira et al. (2013) e Jesus et al. (2017), o rendimento gravimétrico do carvão é diretamente influenciado pela temperatura no processo, sendo que maiores temperaturas finais resultam em redução do rendimento em massa, devido a maior volatilização da matéria orgânica, ou seja, menor rendimento em carvão vegetal. Por isso, não se recomenda intensa

degradação térmica para evitar o comprometimento na produção de carvão vegetal.

Para híbridos de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla*, o rendimento gravimétrico foi de 31,61, 30,55 e 33,06%, com PCS de 7062, 7215 e 7193 kcal.kg⁻¹, para 3, 5 e 7 anos, respectivamente (SOARES, et al. 2014). A taxa de conversão de *Bambusa vulgaris* com três anos de idade em carvão vegetal, descrita por Balduino Junior et al. (2016), mostrou rendimento gravimétrico de 36,40%, com poder calorífico superior de 7431 kcal.kg⁻¹. Considerando a mesma temperatura de carbonização (450 °C), verifica-se que o rendimento em carvão vegetal e o PCS do bambu foi superior ao verificado para madeira de eucalipto.

Dessa forma, considerando a produtividade de 30 ton.ha⁻¹.ano⁻¹ de biomassa de bambu (HERNÁNDEZ-MENA et al., 2014) e dois ciclos de corte de três anos cada, além do rendimento de 36,40%, teríamos 65,52 toneladas por hectare de carvão vegetal de bambu no mesmo período. Sendo o PCS do carvão vegetal da espécie *Bambusa vulgaris* de 7.431 kcal.kg⁻¹, teríamos nestes ciclos 486.879.120 kcal ou 2,038 MJ por hectare.

Ao utilizar os valores médios de 0,411 g.cm⁻³ da densidade básica da madeira de 5 espécies de *Eucalyptus* que apresentaram o rendimento gravimétrico médio de 39,61% (JESUS et al., 2017) e o poder calorífico superior de 8.487 kcal.kg⁻¹ do carvão vegetal de *Eucalyptus urophylla* (Híbrid.) estabelecida por Brito et al. (1987), será necessário produzir 352,39 m³ por hectare, no período de 6 anos, para obter a mesma quantidade de energia.

Considerações finais

O processo de colheita e processamento do bambu é possível, em especial, nos plantios comerciais. Por esta razão, este material é uma alternativa viável para uso energético, tanto através da biomassa *in natura* como na produção de briquetes, pellets e carvão vegetal.

A biomassa de bambu apresenta menor teor de voláteis e maiores teores de extrativos e de carbono fixo do que foi verificado em madeira de *Eucalyptus urograndis*, demonstrando seu potencial para fins energéticos. No entanto, apresenta maior teor de cinzas, o que é desfavorável em relação à madeira de referência.

O Poder Calorífico Superior verificado em briquetes, pellets e no carvão vegetal de bambu é semelhante ao produzido com espécies florestais atualmente utilizadas para estes fins energéticos.

Os pellets de madeira de pinus, eucalipto e *Bambusa vulgaris*, apresentaram similaridade em suas características (umidade, poder calorífico e volume a granel).

Para mesmas condições de carbonização, o rendimento em carvão vegetal de bambu foi superior, em comparação ao verificado na produção que utiliza espécies tradicionais.

Agradecimentos

O presente trabalho foi realizado com o apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de financiamento 001.

Referências bibliográficas

ABIPEL. Pellets de Madeira: Uma questão de competitividade e preço. Associação Brasileira das Indústrias de pellets. **Revista da Madeira**, v. 138, 2014.

ABRAF. Anuário estatístico ABRAF 2013 ano base 2012. **Associação Brasileira de Produtores de Florestas Plantadas**. Brasília: 2013. 148 p.

ANTWI-BOASIAKO, C.; ACHEAMPONG, B. B. Strength properties and calorific values of sawdust-briquettes as wood-residue energy generation source from tropical hardwoods of different densities. **Biomass and Bioenergy**, v. 85, p. 144-152, 2016.

BALDUINO JUNIOR, A. L.; BALDUINO, T. Y.; FRIEDERICHS, G.; CUNHA, A. B.; BRAND, M. A. Energetic potential of bamboo culms for industrial and domestic use in Southern Brazil. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.46, n.11, p.1963-1968, 2016. Doi: 10.1590/0103-8478cr20160233

BRAND, M. A.; BALDUINO JUNIOR, A. L.; NONES, D. L.; GAA, A. Z. N. Potential of bamboo species for the production of briquettes. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 49, e54178, 2019.

BERNSEN, R. S.; KLITZKE, R. J.; BATISTA, D. C.; NASCIMENTO, E. M.; OSTAPIV, F. Resistência à flexão estática e à compressão paralela do bambu-mossô (*Phyllostachys pubescens*). **FLORESTA**, Curitiba, PR, v. 43, n. 3, p. 485-494, 2013.

BRASIL. **Política Nacional de Resíduos Sólidos**, Governo Federal, Brasília, DF, 2010.

BRITO, J. O.; TOMAZELLO, M. F. O.; SALGADO, A. L. B. Produção e caracterização do carvão vegetal de espécies e variedades de bambu. **Scientia Forestalis**, v. 36, p. 13-17, 1987.

CHAOWANA, P. Bamboo: An Alternative Raw Material for Wood and Wood-Based. **Journal of Materials Science Research**, Thailand, v. 2, n. 2, p. 90-102, 2013.

DIAS JÚNIOR, A. F.; ANDRADE, A. M.; COSTA JÚNIOR, D. S. Caracterização de briquetes produzidos com resíduos agroflorestais. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 34, n. 79, p. 225-234, 2014. doi: 10.4336/2014.pfb.34.79.613.

ESCOBAR, J. F. & COELHO, S. T. O Potencial dos pellets de madeira como energia no Brasil. **Jornal Biomassa BR**, v. 3, n. 12, p.9-14, 2014.

FAO. Global Forest Resources Assessment 2010. FAO FORESTRY PAPER 163. **Food and Agriculture Organization of the United Nations**, Rome, Italy, 2010. 378 p.

FAO. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Statistics Division. Forestry Production and Trade. **FAO**, 2018. Disponível em: <http://faostat3.fao.org/download/F/FO/E>. Acesso em: 13/09/2018.

GARCIA, D. P. O mercado e as indústrias de pellets no Brasil. **Associação Brasileira da Indústria de Pellets**. 2014. 34 p.

GOUVÊA, A. F. G.; CARVALHO, A. M. M.; SILVIA, C. M.; CARNEIRO, A. C.; TRUGILHO, P. F.; FREITAS, F. P.; VALADARES, L. B.; GOMES, C. M.; COSTA, E. B. Estudo da adição da lignina kraft nas propriedades mecânicas dos briquetes de resíduos da indústria moveleira. **Ciência Florestal**, v. 27, n. 3, p. 1029-1036, 2017.

GRUPO JOÃO SANTOS. **Material institucional em mídia digital do Grupo João Santos, Coelho Neto, MA**, YoutubeBR, 2007.

GUARNETTI, R. L. **Cogeração de eletricidade utilizando bambu no Brasil: aspectos técnicos econômicos e ambientais**. Tese de Doutorado (em Energia), USP, São Paulo, SP, 2013.

GUARNETTI, R. L. & COELHO, S. T. Cogeração de eletricidade utilizando bambu no Brasil: aspectos técnicos, econômicos e ambientais. **Jornal Biomassa BR**, v. 3, n. 14, p.3-8, 2014.

HERNÁNDEZ-MENA, L.; PÉCORAA, A. A. B.; BERALDO, A. L. Slow pyrolysis of bamboo biomass: analysis of biochar properties. **Chemical Engineering Transactions**, n. 37, p. 115-120, 2014. DOI: 10.3303/CET1437020

JESUS, M. S.; COSTA, L. J.; FERREIRA, J. C.; FREITAS, F. P.; SANTOS, L. C.; ROCHA, M. F. V. Caracterização energética de diferentes espécies de Eucalyptus. **FLORESTA**, v. 47, n. 1, p. 11 - 16, 2017. Doi: 10.5380/ufv.v47i1.48418

LIN, L. D.; CHANG, F. C.; KO, C. H.; WANG, C. T. Bamboo-Derived Fuel from *Dendrocalamus latiflorus*, *Phyllostachys makinoi*, and *Phyllostachys pubescens* Waste. **BioResources**, v. 11, n. 4, p. 8425-8434, 2016.

LOBOVIKOV, M. et al. **World bamboo resources: A thematic study prepared in the framework of the Global Forest Resources Assessment 2005**. Rome, INBAR/FAO, 2007, 80 p.

MACHADO, C.C. **Colheita Florestal**. Viçosa: UFV, 2014. 543 p.

NISGOSKI, S.; MAGALHÃES, W. L. E.; BATISTA, F. R. R.; FRANÇA, R. F.; MUÑIZ, G. I. B. Anatomical and energy characteristics of charcoal made from five species. **Acta Amazonica**, v. 44, n. 3, p. 367 – 372, 2014. Doi: <http://dx.doi.org/10.1590/1809-4392201304572>

PEREIRA, M. A. dos R. **Projeto Bambu: introdução de espécies, manejo, caracterização e aplicações**. Bauru: USP, 2012. 210 p.

SANTOS, D. R. S.; SETTE JÚNIOR, C. R.; SILVA, M. F.; YAMAJI, F. M.; ALMEIDA, R. A. Potencial de espécies de Bambu como fonte energética. **Scientia Forestalis**, v. 44, n. 111, p. 751-758, 2016. Doi: dx.doi.org/10.18671/scifor.v44n111.21

SETTE JÚNIOR, C. R.; FREITAS, P. C.; FEITAS, V. P.; YAMAJI, F. M.; ALMEIDA, R. A. Production and characterization of bamboo pellets. **Bioscience Journal**, v. 32, n. 4, p. 922-930, 2016. Doi: 10.14393/BJ-v32n4a2016-32948

SETTE JÚNIOR, C. R.; LIMA, P. A. F.; LOPES, D. M. M.; BARBOSA, P. V. G.; CONEGLIAN, A.; ALMEIDA, R. A. Characterization of biomass, charcoal, and briquette of *Phyllostachys aurea* Carr. ex A. & C. **Scientia Forestalis**, v. 45, n. 116, p. 619-628, 2017.

SOARES, V. C.; BIANCHI, M. L.; TRUGILHO, P. F.; PEREIRA, A. J.; HOFLER, J. Correlações entre as propriedades da madeira e do carvão vegetal de híbridos de eucalipto. **Revista Árvore**, v. 38, n. 3, p. 543-549, 2014. DOI: 10.1590/S0100-67622014000300017

SUN, Z.Y.; TANG, Y. Q.; MORIMURA, S.; KIDA, K. Reduction in environmental impact of sulfuric acid hydrolysis of bamboo for production of fuel ethanol. **Bioresour Technol.** v. 128, p. 87-93, 2013.

VIEIRA, R. S.; LIMA, J. T.; MONTEIRO, T. C.; SELVATTI, T. S.; BARAÚNA, E. E. P.; NAPOLI, A. Influência da temperatura no rendimento dos produtos da carbonização de *Eucalyptus microcorys*. **Revista Cerne**, Lavras, v. 19, n. 1, p. 59-64, set. 2013.

VIEIRA, M. C.; BRITO, E. O.; GONÇALVES, F. G. Evolução Econômica do Painele Compensado no Brasil e no Mundo. **Floresta e Ambiente**, Seropédica, Rio de Janeiro, v. 19, n. 3, p. 277-285, 2012.

YAZDANI, M. G.; HAMIZAN, M.; SHUKUR, M. N. Investigation of the fuel value and the environmental impact of selected wood samples gathered from Brunei Darussalam. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 16, p. 4965-4969, 2012.

ZANUNCIO, A. J. V.; COLODETTE, J. L.; GOMES, F. J. B.; CARNEIRO, A. C. O.; VITAL, B. R. Composição química da madeira de eucalipto com diferentes níveis de desbaste. **Ciência Florestal**, v. 23, n. 4, p. 755-760, 2013.

Capítulo 4: MODELAGEM DE MISTURAS NA PRODUÇÃO DE PAINÉIS DE ALTA DENSIDADE (HDP) A PARTIR DE BAMBU E COPARTICIPAÇÃO DE ERVA-MATE

Resumo - O objetivo deste trabalho foi avaliar a influência do tipo de material nas propriedades físico-mecânicas de painéis de partículas de alta densidade (HDP) a partir de materiais lignocelulósicos alternativos. Foram produzidas partículas de bambu (*Phyllostachys aurea*), de palitos finos de erva-mate (*Ilex paraguariensis*), também foram utilizadas partículas comerciais da madeira de *Pinus taeda*. Estas partículas, em diferentes proporções de misturas, foram encoladas em misturador rotativo tipo tambor, com a resina Melamina-Ureia-Formaldeído (MUF), pré-moldadas a mão e prensadas em prensa hidráulica a 120°C, por 10 minutos, com 60 kgf.cm⁻² de pressão, até a espessura das barras limitadoras de aço de 6 mm. A análise estatística foi realizada seguindo o planejamento centróide simplex, utilizando sete combinações dos três componentes, com três repetições. Os resultados mostraram que as variáveis densidade, teor de umidade, inchamento (2 e 24 horas), absorção de água (2 horas), a resistência e a rigidez em flexão estática (MOR e MOE) e a resistência à tração perpendicular, são explicadas pelo modelo cúbico, enquanto a absorção de água (24 horas) e a dureza são explicadas pelo modelo quadrático. Os melhores resultados observados para as propriedades físicas foram nas misturas de bambu e *Pinus taeda*, e nas propriedades mecânicas, a mistura de bambu, erva-mate e *Pinus taeda*.

Palavras-chave: Painéis de alta densidade; planejamento centróide simplex; materiais lignocelulósicos alternativos.

Modeling of mixtures in the production of high density panels (HDP) from bamboo and coparticipation of yerba mate

Abstract - The objective of this study was to evaluate the influence of the material type on the physical-mechanical properties of high density particles panels (HDP) from alternative lignocellulosic materials. Particles of bamboo (*Phyllostachys aurea*), finely chopped sticks of mate herb (*Ilex paraguariensis*), commercial particles of *Pinus taeda* wood were also used. These particles, in different proportions of mixtures, were glued in a drum-type rotary mixer with Melamine-Urea-Formaldehyde (MUF) resin, handmade molded and pressed in hydraulic press at 120 °C and 60 kgf.cm⁻² for 10 minutes, up to the thickness of the 6 mm steel limiting bars. Statistical analysis was performed following the simplex centroid experimental design, using seven combinations of the three components, with three replicates. The results showed that the variables density, moisture content, swelling (2 and 24 hours), water absorption (2

hours), strength and stiffness in static bending (MOR and MOE) and perpendicular tensile strength, are explained by the cubic model, while the water absorption (24 hours) and the hardness are explained by the quadratic model. The best results observed on physical properties for bamboo and *Pinus taeda* mixtures, and in the mechanical properties, the mixture of bamboo, mate herb and *Pinus taeda*.

Keywords: High density panels; Simplex centroid planning; Alternative lignocellulosic materials.

Introdução

Os painéis de madeira aglomerada surgiram no início da década de 1940, para viabilizar a utilização de resíduos de madeira, em virtude da escassez de madeiras de boa qualidade para produção de painéis compensados, causada pelo isolamento da Alemanha durante o período da Segunda Guerra Mundial (IWAKIRI et al., 2005a). No Brasil, a produção teve início em 1966, pela empresa Placas do Paraná S.A., instalada na cidade de Curitiba-PR (IWAKIRI et al., 2005b), com diversos questionamentos relativos à qualidade do produto, devido à elevada absorção de água e inchamento em espessura (MELO et al., 2009).

Foi somente nos anos de 1990, que as empresas brasileiras produtoras de painéis aglomerados começaram a investir em tecnologia, como na substituição das prensas cíclicas pelas contínuas e o uso de novas resinas e aditivos. Este processo de aperfeiçoamento desencadeou a melhoria da qualidade dos painéis e posterior expansão do seu consumo no mercado nacional (MATTOS et al., 2008). No Brasil, no período entre 1995 e 2005, seu consumo evoluiu de 866 mil m³ para 2.098 mil m³, o que representou um crescimento médio de 9,3 % ao ano, superior aos 4,5 % verificados na taxa mundial neste mesmo período (GUIOTOKU et al., 2008).

Para Mesquita et al. (2015), os painéis de partículas de média densidade (MDP), são uma evolução dos painéis aglomerados, por possuírem três camadas, geralmente de partículas de madeira, sendo as menores nas faces e as maiores no seu miolo, e utilizados principalmente para a fabricação de móveis. Contudo, a razão mais adequada para nova denominação seriam os investimentos na modernização tecnológica das empresas brasileiras de painéis aglomerados, na metade da década de 1990, que possibilitaram a fabricação de produtos com menor absorção de umidade e maior resistência ao arrancamento de parafusos e ao empenamento. Com isso, implementou-se uma estratégia de Marketing, por meio da modificação da sua nomenclatura tradicional para painel MDP, em uma tentativa de dissociar este novo painel particulado do aglomerado que existia anteriormente (MATTOS et al., 2008).

O termo ‘partícula’ corresponde ao componente agregado de um painel aglomerado, podendo ser de madeira ou outro material lignocelulósico. No segmento industrial de base florestal constata-se, anualmente, uma crescente demanda por madeira e, com isso, as indústrias têm buscado diversificar suas fontes de matérias-primas lignocelulósicas para complementar a produção de painéis reconstituídos (CALEGARI et al., 2007; MELO et al., 2009; STANGERLIN et al., 2011). A matéria-prima para produção deste moderno painel particulado pode ser todo e qualquer material lignocelulósico, podendo-se ainda misturar diferentes tipos de madeira ou associar as partículas de madeira a outros materiais (SORATTO et al., 2013; MESQUITA et al., 2015; CRAVO et al., 2015).

Neste contexto, surge a possibilidade de uso de diversos tipos de resíduos lignocelulósicos gerados pela agroindústria brasileira, como uma alternativa para atender à demanda do setor de painéis particulados. A produção de painéis com este tipo de material pode proporcionar agregação de valor e expansão ao complexo agroindustrial, reduzir os riscos de impactos ambientais com seu descarte, diminuir a pressão sobre as florestas e tornar a produção dos painéis ainda mais competitiva sob o cenário econômico, devido à redução de custos (MENDES, et al., 2009 e MENDES et al., 2010, MELO et al., 2015).

Entre os painéis derivados de madeira, o particulado é atualmente o tipo mais consumido no mundo e pode ser produzido a partir de qualquer material lignocelulósico, desde que forneça resistência mecânica e peso específico que atendam aos padrões exigidos (VARANDA et al., 2014). Dentre eles, destaca-se os de média densidade (MDP) e os de alta densidade (HDP).

Iwakiri et al. (2010) verificaram que os painéis particulados produzidos com a mistura de embaúba e paricá apresentaram melhores propriedades físicas e mecânicas que a utilização da madeira de cada espécie pura. A utilização de madeira pesada na produção de painéis particulados pode ser possível na medida em que estas são misturadas com madeira de baixa densidade, possibilitando obter painéis com satisfatórias propriedades (SANCHES et al., 2016).

Arruda et al. (2011) avaliaram a viabilidade técnica da mistura de partículas de bambu (*G. magna*) para a produção de painéis MDP com madeira de *Pinus taeda* e colados com resinas sintéticas (UF e PF), verificando que não ocorreu influência no desempenho mecânico dos painéis com a mistura de até 25% de partículas de bambu.

Para Del Menezzi et al. (1996) e Hillig et al. (2003), a utilização de misturas de espécies na produção dos painéis apresenta vantagens, como a variação da área superficial, que interfere na qualidade das propriedades do material. De modo geral, a densidade básica dos painéis tem maior influência sobre suas propriedades mecânicas, independente da espécie utilizada, enquanto para as propriedades de estabilidade dimensional a espécie utilizada apresenta maior influência.

Hiziroglu et al. (2005) avaliaram painéis particulados produzidos com diferentes proporções de bambu (*Dendrocalamus asper*), *Eucalyptus camaldulensis* e palha de arroz, verificando que o aumento das porcentagens de bambu nos painéis contribuiu para aumento do Módulo de ruptura, do Módulo de Elasticidade e da Ligação Interna. Para Mendes et al. (2017), a utilização de bambu na produção de painéis aglomerados mostrou-se viável tecnicamente, por terem atendido a todos os requisitos estipulados pela norma brasileira de comercialização e apresentando propriedades mecânicas semelhantes aos painéis comerciais de pinus e eucalipto.

Carvalho et al. (2015) avaliaram painéis produzidos com os resíduos de poda de erva-mate, que apresentaram menor umidade de equilíbrio higroscópico e menor absorção de água, após 24 h de imersão. Ainda em estudo com diferentes partículas, Souza (2016) constatou para os painéis puros de erva-mate, de mistura de erva-mate e pinus, além da mistura de erva-mate, pinus e eucalipto, valores de 1181,45; 2214,32 e 2101,46 MPa para MOE; 4,84, 10,36 e 1,43 MPa para MOR e 0,57; 0,54 e 0,46 MPa para tração perpendicular, respectivamente.

Para Iwakiri et al. (2005b), empresas de painéis particulados consideraram na época a possibilidade de produção de painéis destinados para pisos e, para tanto, fatores como alta densificação do painel, partículas com dimensões menores visando melhor acabamento superficial e uso de resina resistente à umidade foram considerados. A determinação da razão de compactação (RC), considerando as composições de partículas dos diferentes materiais, é fundamental para compreensão das relações envolvidas no uso do adesivo e do processo termomecânico, facilitando o entendimento das propriedades físicas e mecânicas verificadas nos painéis produzidos.

Os painéis são formados por elementos desagregados, denominados de partículas, que por meio de ligação adesiva, são reconstituídos, apresentando propriedades diferentes do material original. A geometria das partículas interfere na qualidade percebida dos produtos, portanto, quando se objetiva a agregação de valor para os resíduos vegetais, o estudo de suas dimensões é determinante para a padronização dos processos (JORDÃO et al., 2017). Para Haselein et al. (2002), a geometria das partículas é um fator básico determinante das características dos painéis, influenciando suas propriedades físico-mecânicas.

As variações geométricas dos materiais remetem à necessidade do estudo de suas propriedades ao nível dimensional do elemento gerado (tamanho final) e formato (disco, escama, lasca ou tiras, etc.), pelo fato de isso interferir nos processos industriais e nas características dos produtos finais. A conversão de um coproduto em um recurso requer

cautela em relação à sua qualidade e propriedades, de forma que o torne atraente para determinada atividade, garantindo seu valor econômico como produto.

As partículas dos palitos de erva-mate apresentam a forma de disco (JENSEN, 2011), sendo classificadas como escamas (arredondadas), provavelmente, influenciadas pela imaturidade do material, por apresentar idade entre 6 e 18 meses, sem a plenitude de seu processo de lignificação. As partículas de bambu foram classificadas como lascas, por se apresentarem num formato estreito e alongado. As partículas comerciais de pinus foram classificadas como pequenas tiras, com reduzida espessura, mas de maior largura e com comprimento reduzido.

Para compreender o efeito da composição de diferentes misturas em um ensaio, pode-se utilizar a técnica denominada de modelagem de misturas. Para tanto, deve-se considerar que as propriedades de uma mistura são determinadas pelas proporções de seus componentes e as proporções dos diversos componentes são dependentes entre si (HILLIG et al., 2003).

O método da modelagem de misturas recebeu o nome de “planejamento em rede simplex”, sendo geralmente utilizado para avaliar misturas de três componentes. Para encontrar soluções que expressem os valores de uma variável dependente em função da proporção de cada componente da mistura, é utilizada a resolução de equações pelo método dos mínimos quadrados (MONTGOMERY, 2001; HILLIG et al., 2003).

Assim, realizou-se este estudo para avaliar as propriedades de painéis de alta densidade (HDP) produzidos com diferentes proporções de misturas de madeira de *Pinus taeda*, bambu e palitos de erva-mate, tendo em vista a hipótese de que esses materiais lignocelulósicos podem ser utilizados como materiais alternativos para a produção desses painéis.

Material e métodos

Produção de cavacos de bambu

Na produção de cavacos de bambu, utilizou-se indivíduos maduros, com idades estimadas entre três e quatro anos, isto em virtude de sua aparência externa. Foram selecionados trinta indivíduos com uniformidade em altura, diâmetro de haste e espessura de paredes, além de forma geométrica reta, visando facilitar o processo de picagem dos cavacos. As dimensões finais dos cavacos de bambu foram de aproximadamente 3; 20 e 40 mm de espessura, largura e comprimento, respectivamente. Posteriormente, o material foi encaminhado para secagem ao sol em ambiente aberto e ventilado, até atingir teor de umidade de equilíbrio com o ambiente.

Na Figura 1 são apresentados o volume total de hastes colhidas (A), o equipamento utilizado para produção dos cavacos de bambu (B) e a quantidade de cavaco produzido (C).



Figura 1. Processo de produção dos cavacos de bambu. A) As hastes utilizadas (30 unidades); B) Picador florestal acoplado ao sistema hidráulico de trator agrícola, durante a picagem das hastes de bambu em cavacos. C) Volume total de cavaco produzido.

Produção de partículas de erva-mate e bambu em laboratório

Na Figura 2 estão ilustrados os cavacos de bambu (A) e os palitos de erva-mate (B), que foram picados em triturador forrageiro. Os palitos de erva-mate foram obtidos de ramos finos, em geral de formato cilíndrico, de no máximo 7,5 mm de diâmetro e comprimento variado na condição *in natura*, sendo que após o processo de processamento e secagem, as dimensões médias foram de 3,4 mm e 39,7 mm, respectivamente³.

O material resultante da picagem, tanto da erva-mate como dos cavacos de bambu, foi peneirado conforme as especificações de classificação da ASTM, em diferentes malhas *mesh*. O material utilizado na produção de painéis de alta densidade (HDP) foi composto por partículas com granulometria variando entre 8 e 12 *mesh*, conforme ilustrado na Figura 3.



Figura 2. Processo de picagem. A) Cavacos de bambu. B) Palitos de Erva-mate.



Figura 3. Partículas produzidas em laboratório e comerciais de *Pinus taeda*. A) *Pinus taeda*. B) Bambu. C) Erva-mate.

³ Foram selecionados ao acaso 150 palitos de erva-mate, que foram medidos com paquímetro, possibilitando a determinação de valores médios para seu diâmetro e comprimento.

Além das partículas de *Phyllostachys aurea* e de palitos de *Ilex paraguariensis*, foram utilizadas na confecção dos painéis de partículas de alta densidade desta pesquisa, partículas comerciais de *Pinus taeda* produzidas numa indústria de painéis MDP da região.

Confecção dos painéis

A confecção dos painéis foi realizada no laboratório de Tecnologia da Madeira da UNICENTRO. Após a classificação por peneiras conforme especificações de granulometria da ASTM, o material foi levado à estufa com temperatura de 60 ± 2 °C até atingirem entre 3 e 5 % de teor de umidade. A razão de compactação (RC) dos painéis foi calculada pela seguinte relação: densidade do painel dividida pela densidade natural do material que originou as partículas ou a média da mistura dos diferentes materiais utilizados.

Para a encolagem das partículas foi utilizada a resina Melamina-Ureia-Formaldeído (MUF) comercial, da marca Pole Cola, sendo que a proporção utilizada foi de 14% em relação à massa seca das partículas. A caracterização deste adesivo é apresentada na Tabela 1.

Tabela 1. Propriedades do adesivo (MUF) usado no experimento

Table 1. Adhesive (MUF) properties used in the experiment

Parâmetros	Características e valores médios
Aspecto	Líquido leitoso homogêneo sem sólidos em suspensão
Densidade (25°C)	1.215 a 1.225
pH (25°C)	7,8 a 8,5
Formol livre	< 0,5%
Teor de sólidos	$62,0 \pm 0,5$ %
Viscosidade brookfield (25°C)	200 a 250 cP
Gel time (água fervente)	60 a 80 segundos

Fonte: Pole Cola (2011).

Também foi aplicado 1% de emulsão de parafina, para reduzir a higroscopicidade dos painéis e 2% de catalizador sulfato de amônio, para acelerar a cura do adesivo. Após a aplicação do adesivo, catalizador e parafina, com pistola e compressor de ar, foi realizada a montagem do colchão, com uma distribuição manual e uniforme da mistura em uma caixa formadora de 40x40 cm. O teor de umidade adotado no colchão foi de 13%, sendo acrescido água quando necessário.

Em seguida, o colchão passou pela pré-prensagem manual à frio para fazer sua compactação e, por fim, foi prensado em prensa hidráulica de pratos com aquecimento elétrico, à temperatura de 120°C, por 10 minutos a uma pressão específica de 60 kgf.cm^{-2} , sendo utilizadas barras limitadoras de aço de 6 mm para delimitar a espessura do painel. Os painéis foram

produzidos com $0,90 \text{ g.cm}^{-3}$ de densidade nominal e, após a prensagem, foram climatizados por uma semana em ambiente com temperatura de 20°C e 65% de teor de umidade relativa do ar.

Posteriormente, foram produzidos dois corpos de prova de cada painel confeccionado, totalizando seis por ensaio em cada tratamento, seguindo as determinações das Normas Europeias (EN) 312/03, 310/93, 319/93 e 323/93, 322/05, 317/05 e a Americana ASTM D 1037/2006, respectivamente, para as especificações e ensaios de flexão estática, tração perpendicular, densidade aparente, teor de umidade, inchamento em espessura, absorção de água e dureza Janka.

Delineamento experimental e análise estatística

Foram testados os pressupostos de normalidade dos dados e a homogeneidade de variância, por meio dos testes de Shapiro Wilks e de Bartlett. Atendidas estas prerrogativas, foi realizada análise dos resultados pelos métodos de análise de variância e de modelagem de misturas. A análise estatística foi realizada em duas etapas. Primeiro foi realizada análise de variância, a fim de verificar se ocorreu diferença das propriedades avaliadas entre os tipos de painéis produzidos. Havendo diferenças significativas, foi aplicado teste de médias (Tukey). Essa análise permitiu comparar as propriedades dos painéis entre eles e com as normas e padrões de referência.

Numa segunda etapa, foi utilizado o modelo experimental denominado planejamento em rede centróide simplex, que apresenta três modelos em seu delineamento. O mais simples é o linear que procura explicar o comportamento de uma propriedade apenas com os resultados obtidos com a utilização de cada componente individualmente. Ao considerar as misturas, ocorrem os modelos quadráticos que consideram os efeitos das interações de dois componentes, e por fim, o modelo cúbico que considera os efeitos da interação dos três componentes. Os modelos utilizados estão expressos nas equações derivadas 1, 2 e 3, respectivamente.

$$Y_i = b_1 * X_1 + b_2 * X_2 + b_3 * X_3 \quad (1)$$

$$Y_i = b_1 * X_1 + b_2 * X_2 + b_3 * X_3 + b_{12} * X_1 * X_2 + b_{13} * X_1 * X_3 + b_{23} * X_2 * X_3 \quad (2)$$

$$Y_i = b_1 * X_1 + b_2 * X_2 + b_3 * X_3 + b_{12} * X_1 * X_2 + b_{13} * X_1 * X_3 + b_{23} * X_2 * X_3 + b_{123} * X_1 * X_2 * X_3 \quad (3)$$

Y_i = Variável resposta; b_i = Coeficientes; X_i = Proporção de cada espécie na mistura.

Para a determinação dos coeficientes, foram utilizadas as sete misturas mínimas necessárias para o modelo cúbico (Tabela 2). Na avaliação, foram testados modelos simples, quadrático e cúbico para todas as propriedades analisadas, sendo descartados os coeficientes não-significativos pelo teste “t”.

Tabela 2. Delineamento experimental**Table 2.** Experimental design

Modelo	Proporções de misturas (%)		
	Bambu	Erva-mate	Pinus
Linear	100	0	0
	0	100	0
	0	0	100
Quadrático	50	50	0
	0	50	50
	50	0	50
Cúbico	33,3	33,3	33,3

Resultados e discussão

Propriedades físicas

Na Tabela 3 estão apresentados os valores médios de densidade aparente de cada tipo de partícula ou mistura utilizada para produção dos painéis, a densidade aparente, teor de umidade e a razão de compactação (RC) de cada tipo de painel, sendo aplicada análise de variância para densidade e teor de umidade dos painéis.

Tabela 3. Densidade aparente das misturas e dos painéis, teor de umidade e razão de compactação dos painéis**Table 3.** Apparent density of the blends and panels, moisture content and compaction ratio of the panels

Tratamento	Densidade aparente do material (g.cm ⁻³)	Densidade aparente dos painéis (g.cm ⁻³)	Teor de umidade (%)	Razão de Compactação (RC)
T1 (B 100%)	0,740	0,877 a	9,35 ab	1,2
T2 (E 100%)	0,450	0,877 a	9,28 ab	1,9
T3 (P 100%)	0,410	0,922 a	10,86 c	2,2
T4 (B 50%; E 50%)	0,590	0,914 a	8,79 a	1,5
T5 (E 50%; P 50%)	0,430	0,936 a	9,76 abc	2,2
T6 (B 50%; P 50%)	0,570	0,897 a	9,95 abc	1,6
T7 (B 33,3%; E 33,3%; P 33,3%)	0,530	0,927 a	10,51 bc	1,7

B: Bambu *Phyllostachys aurea*; E: *Ilex paraguariensis* (Erva-mate); P: *Pinus taeda*. Médias seguidas de mesma letra não diferem pelo teste F ou Tukey, a 5% de probabilidade de erro.

O valor médio verificado para a densidade dos diferentes tipos de painéis não apresentou diferença estatística significativa (Tabela 3). Para Guimarães Jr. et al. (2011), isto ocorre devido ao

fato de todo e qualquer material lignocelulósico ter potencial para ser utilizado como matéria-prima para a fabricação de painéis de partículas. Os painéis confeccionados obtiveram a densidade semelhante à pré-determinada de $0,90 \text{ g.cm}^{-3}$, variando de $0,877$ a $0,936 \text{ g.cm}^{-3}$, o que os classificam como painéis de alta densidade, destinados ao uso comercial ou industrial, segundo as normas ANSI A208.1 (1993; 2003), NBR 14810-2 (2006) e CS 236-66, sendo esta classificação importante, em virtude dos valores mínimos de módulo de elasticidade, módulo de ruptura, inchamento em espessura e absorção de umidade guardarem estreita relação com a densidade.

A variação observada nos painéis é associada às características das partículas utilizadas para sua fabricação, tais como umidade, mas, principalmente, diferença na densidade dos materiais empregados (IWAKIRI, 2005). Os painéis puros de bambu e as misturas de bambu e erva-mate e de bambu e pinus apresentaram valores médios de RC variando entre 1,2 e 1,6, sendo que a mistura dos três apresentou 1,7. Já nas demais condições experimentais, painéis puros de pinus e de erva mate e na mistura de erva-mate e pinus, o valor médio foi de 1,9 a 2,2, consistente com os resultados de Mendes et al. (2012), que observaram maiores valores em painéis que apresentaram densidade mais elevada.

O uso de partículas de bambu e de palitos de erva mate é uma possibilidade para a produção de painéis reconstituídos, em especial com uso de resinas resistentes à umidade. Com relação ao bambu, o mesmo se constitui num material adequado para painéis de alta densidade, por apresentar naturalmente densidade elevada.

Quanto ao teor de umidade, constatou-se que os painéis de pinus, apresentaram valores superiores aos demais painéis, tanto puros como em diferentes composições de misturas. Este resultado pode ser atribuído ao fato de a composição química dos materiais lignocelulósicos dos demais tipos de partículas ser semelhante à da madeira de folhosas, que contêm menor teor de lignina e maior teor de hemiceluloses (ROWELL et al., 2000).

Os teores de umidade variaram entre 8,79% (mistura bambu e erva-mate) até 10,86% (pinus puro), sendo que todos os tipos de painéis apresentaram valores inferiores ao teor de umidade de equilíbrio da madeira serrada, em idênticas condições de climatização. A justificativa para a reduzida higroscopicidade é a perda de água de constituição, devido ao processo termomecânico (elevada temperatura e pressão) aplicado, aliado à adição de resina e aditivos (WU, 1999).

A norma ANSI A208.1 especifica que o inchamento em espessura máximo permitido é de 8%, enquanto que a absorção de água máxima é de 30% para painéis de alta densidade. Verificou-se que os painéis puros de bambu apresentaram maior absorção de água e

inchamento após 24 h de imersão (Tabela 4). Essa tendência é uma consequência do contato enfraquecido entre as partículas e o adesivo, devido a higroscopicidade, condição menos polar (em comparação à madeira) e o pH do bambu, que provocou baixa retenção do adesivo, causando aumento do inchamento em espessura e da absorção de água.

Tabela 4. Valores médios das propriedades físicas dos painéis HDP.

Table 4. Mean values of HDP physical properties.

Tratamento	Bambu	Erva-mate	Pinus	IN2h (%)	AA2h (%)	IN24h (%)	AA24h (%)
1	100	0	0	21,48 e	22,12 bc	30,93 d	45,01 d
2	0	100	0	12,57 bc	32,17 d	13,34 a	43,30 d
3	0	0	100	11,85 b	8,96 a	20,51 c	24,86 a
4	50	50	0	11,38 ab	25,08 c	13,01 a	35,53 b
5	0	50	50	15,29 d	20,78 bc	19,22 c	40,98 cd
6	50	0	50	10,70 a	11,82 a	16,87 b	32,57 b
7	33,3	33,3	33,3	13,83 c	17,79 b	20,58 c	36,71 bc

IN = Percentual de Inchamento (2 e 24 h); AA = Absorção de Água (2 e 24 h); % = Percentual. Médias seguidas de mesma letra não diferem pelo teste Tukey, a 5% de probabilidade de erro.

No presente estudo, nenhum tipo de painel apresentou valores de inchamento após 24 h de imersão em água que atendessem as exigências da norma ANSI A208.1. Constatou-se que os painéis puros de erva-mate e da mistura entre bambu e erva-mate tiveram menor inchamento, enquanto que a menor absorção de água ocorreu nos painéis puros de pinus, todos diferindo estatisticamente dos demais. Observou-se diferença significativa na absorção e no inchamento em espessura, entre os painéis produzidos com diferentes tipos de materiais e misturas.

Os painéis produzidos com palitos de erva-mate, por apresentarem partículas mais arredondadas e formadas por material juvenil (mais poroso), permitem maior absorção de água, por outro lado, inibem o inchamento. Isto pode ser em função de uma melhor compactação durante o processo de colagem termomecânica.

Propriedades mecânicas

Segundo os parâmetros de classificação da norma de comercialização ANSI A208.1, os painéis produzidos neste experimento se assemelham aos da categoria H1, para painéis de alta densidade (superior a 0,80 g.cm⁻³), com resistências mínimas de 16,5 MPa para MOR, 2400 MPa para MOE e 0,90 MPa para tração perpendicular, sendo seu uso recomendado para fins industriais (ANSI, 1993) (Tabela 5).

Tabela 5. Valores médios das propriedades mecânicas dos painéis HDP**Table 5.** Mean values of HDP mechanical properties

Tratamento	Bambu	Erva-mate	Pinus	MOR	MOE	RT	DJ
				(MPa)	(MPa)	(MPa)	(MPa)
1	100	0	0	14,20 cd	2367,5 ab	0,49 e	40,17 d
2	0	100	0	12,02 d	1549,9 c	0,92 c	44,63 c
3	0	0	100	19,47 a	2615,0 a	0,75 d	53,35 b
4	50	50	0	15,41 bc	2124,6 b	1,04 bc	56,05 b
5	0	50	50	16,85 b	2197,4 b	1,12 ab	54,44 b
6	50	0	50	19,43 a	2700,9 a	0,63 de	60,82 a
7	33,3	33,3	33,3	19,77 a	2488,7 ab	1,28 a	56,72 ab

Flexão estática (MOR = Módulo de Ruptura; MOE = Módulo de Elasticidade); RT = Resistência à Tração perpendicular; DJ = Dureza Janka. Médias seguidas de mesma letra não diferem pelo teste Tukey, a 5% de probabilidade de erro.

Todos os tipos de painéis com alguma proporção de pinus atenderam aos requisitos de MOR em flexão estática das normas ABNT 14810 (2006), ANSI A208.1 (1999), EN 312 (2003) e CS 236-66 (1968). Os valores maiores de MOR para pinus são justificados pela maior esbeltez das partículas, acompanhado pelo elevado valor da razão de compactação constatada nestes painéis. O baixo desempenho do painel puro de erva-mate, se deve ao formato arredondado de sua partícula (curta e larga), resultando em valores de flexão inferiores. Os painéis puros de bambu apresentaram contato enfraquecido entre suas partículas e o adesivo, por ser um material menos polar (em comparação à madeira), com pH mais elevado, promovendo baixa retenção de adesivo nas partículas, justificando o reduzido valor de MOR. Já a mistura composta por bambu e erva-mate, atendeu aos 15 MPa da norma EN 312 (2003).

Todos os painéis apresentaram valores de MOE em flexão estática superiores aos requisitos mínimos da norma EN 312 (2003) de 2050 MPa, exceto na condição experimental erva-mate pura. Já o painel puro de pinus, a mistura tripla (bambu, erva-mate e pinus) e a de bambu e pinus atenderam as exigências da norma ANSI A208.1 (1999) e CS 236-66 (1968) de 2400 MPa, sendo que o valor do painel puro de bambu aproximou-se deste parâmetro (não tendo diferido estatisticamente dos melhores resultados obtidos).

O MOE é diretamente correlacionado com a geometria das partículas, ou seja, as partículas com maior esbeltez, no caso, bambu e pinus, tendem a possibilitar um painel com maior rigidez. Além disso, a estrutura anatômica do bambu, formada por fibras consideradas rígidas, de parede celular mais espessa, lúmen estreito e mais finas que as verificadas nas espécies arbóreas tradicionalmente utilizadas, possibilitou satisfatórios valores de MOE, apesar da deficiência constatada no seu processo de colagem.

Com base nestes resultados, constata-se que houve nítida tendência de redução do módulo de ruptura e do módulo de elasticidade dos painéis com o aumento da proporção de partículas de erva-mate em função do formato de sua partícula, o oposto foi constatado para o pinus. Contudo, na mistura tripla o uso de partícula de erva-mate não provocou redução das propriedades de MOR e MOE em flexão estática.

Os painéis puros de erva-mate ou com alguma proporção na mistura, apresentaram valores de ligação interna superiores aos valores mínimos de 0,90 MPa da norma ANSI A208.1 (1999) e de 0,86 MPa, exigido pela Norma CS 236-66 (1968), para painéis aglomerados com densidade superior a 0,80 g.cm⁻³ e colagem fenólica. A mistura do material erva-mate possibilitou um aumento de 49, 112 e 103%, respectivamente quando comparado com o material puro de pinus, puro de bambu e na mistura de bambu e pinus. Isso se justifica pelo formato arredondado das partículas de erva-mate, que permitiu melhor acomodação no processo de prensagem.

Os valores de ligação interna dos painéis puros de bambu e pinus não atingiram o mínimo recomendado pelos padrões e normas internacionais ANSI A208.1 (1999). Houve dificuldade de aderência do adesivo no material bambu durante a encolagem no tambor, indicando que para esses painéis é necessário melhorar o processo de encolagem. Entre as alternativas, ajustes no pH do adesivo e pré-tratamento das partículas podem melhorar a adesão entre as partículas e, por consequência, as propriedades mecânicas dos painéis.

A norma ANSI A 208.1 estabelece para dureza Janka, valor mínimo de 22,7 MPa em painéis aglomerados, sendo que todos os painéis produzidos superaram este parâmetro. Com relação aos elevados valores de dureza Janka dos painéis produzidos puros de pinus e suas misturas com bambu e erva-mate, se justifica para o bambu, a existência de fibras de parede celular espessa e rígida, classificadas como lascas (estreitas e alongadas), com elevada esbeltez, e, para a erva-mate, o formato arredondado de suas partículas, que possibilitam um completo entrelaçamento dos materiais. Da mesma forma, partículas mais esbeltas (bambu e pinus) tendem ao aumento da rigidez e a dureza do painel.

Bianche et al. (2012) observaram valores de dureza Janka entre 34,1 e 50,5 MPa em painéis MDP (0,63 a 0,71 g.cm⁻³) produzidos com misturadas de madeiras de *Eucalyptus urophylla* e *Schizolobium amazonicum* e fibras de vassoura (*Sida* spp.), com 6% ou 8% de uréia-formaldeído.

Modelagem de misturas

Na Tabela 6 são apresentadas as equações simplificadas, nas quais foram descartados os coeficientes não-significativos pelo teste “t” de Student, para as propriedades físico-mecânicas dos painéis HDP.

Tabela 6. Equações simplificadas para as propriedades físico-mecânicas dos painéis HDP, utilizando-se apenas os coeficientes significativos pelo teste “t”.

Table 6. Simplified equations for HDP physical-mechanical properties, using only the “t” test significant coefficients.

Equações	F	R ²
Propriedades físicas		
Dap = 0,009*B+0,009*E+0,009*P+1,48*10 ⁻⁵ *B*E+1,48*10 ⁻⁵ *E*P-1,19*10 ⁻⁶ *B*P+1,25*10 ⁻⁷ *B*E*P	3762,00	0,364
TU = 0,094*B+0,093*E+0,109*P-6,32*10 ⁻⁵ *B*P+3,07*10 ⁻⁵ *B*E*P	1233,17	0,601
IN2h = 0,215*B+0,126*E+0,119*P-0,002*B*E+0,001*E*P-0,002*B*P+6,04*10 ⁻⁵ *B*E*P	521,37	0,883
AA2h = 0,221*B+0,322*E+0,09*P-0,001*B*E+8,63*10 ⁻⁵ *E*P-0,001*B*P-2,17*10 ⁻⁵ *B*E*P	312,42	0,918
IN24h = 0,309*B+0,133*E+0,205*P-0,004*B*E+0,001*E*P-0,004*B*P	4145,18	0,990
AA24h = 0,450*B+0,433*E+0,249*P-0,003*B*E+0,003*E*P-0,001*B*P+2,28*10 ⁻⁵ *B*E*P	1128,37	0,901
Propriedades mecânicas		
MOR = 0,142*B+0,12*E+0,195*P+0,001*B*E+0,001*B*P+5,13*10 ⁻⁵ *B*E*P	966,76	0,804
MOE = 23,675*B+15,499*E+26,15*P+0,066*B*E+0,046*E*P+0,084*B*P+0,003*B*E*P	639,92	0,709
RT = 0,005*B+0,009*E+0,007*P+4,67*10 ⁻⁶ *B*P+7,73*10 ⁻⁶ *B*E*P	645,00	0,907
DJ = 0,402*B+0,446*E+0,533*P+0,005*B*E+0,002*E*P+0,006*B*P	3316,41	0,931

F = valor de F calculado; R² = coeficiente de determinação; B = Proporção de bambu; E = Proporção de erva-mate; P = Proporção de pinus; Dap = Densidade aparente; TU = Teor de umidade; IN = Percentual de Inchamento (2 e 24 h); AA = Absorção de Água (2 e 24 h); MOR = Módulo de Ruptura; MOE = Módulo de Elasticidade; RT = Resistência à Tração; DJ = Dureza Janka. Valores significativos ao nível de 5% de probabilidade de erro.

Na análise dos dados de densidade, constatou-se que não houve influência dos componentes puros, o que era esperado, pois foi estabelecida uma densidade nominal de 0,90 g.cm⁻³. Ao término da prensagem do painel, quando da abertura da prensa, pode ocorrer um aumento da espessura causada pela liberação das tensões de compressão e isso refletiu numa diminuição da densidade do painel. No entanto, o valor dos coeficientes de cada espécie pura foi 0,009 para todas as espécies, demonstrando que a densidade dos painéis foi semelhante à nominal estabelecida em todos os tipos de partículas usadas. Por outro lado, foi verificada interação quadrática e cúbica. Para a interação quadrática entre bambu e erva-mate, erva-mate e pinus e na interação cúbica entre bambu, erva-mate e pinus, foi constatada uma correlação positiva, elevando os valores da densidade, contudo, foi negativa na mistura entre bambu e pinus.

O TU foi semelhante entre bambu e erva-mate e de valor mais elevado para os painéis de pinus. Os coeficientes das misturas de duas espécies (interação dupla) não foram significativos, se presente a erva-mate. Houve interação tripla e positiva entre as três espécies utilizadas, o que ocasionou maior teor de umidade em relação ao uso das espécies puras de bambu e erva-mate.

Para o inchamento em espessura dos corpos-de-prova quando submersos em água por duas horas, o bambu foi o material que apresentou estimativa mais elevada, seguida pela erva-mate. Os coeficientes das interações quadráticas e da cúbica foram todos significativos, no entanto, com sinais diferentes. As misturas de bambu com erva-mate e bambu com pinus apresentaram interações negativas, pois contribuíram para a redução do percentual de

inchamento, contudo, a mistura de erva-mate com pinus apresentou interação positiva. Já na mistura dos três tipos de partículas, a interação foi positiva por causar aumento no inchamento.

A absorção de água em duas horas apresentou variação diferente do inchamento entre os diferentes tipos de partículas usadas, sendo que as de erva-mate apresentaram maior absorção seguida das de bambu e pinus, respectivamente. A absorção de água em 2 horas foi significativamente menor para pinus em relação ao bambu e à erva-mate. Os coeficientes das interações quadráticas não foram significativos para qualquer das misturas de dois tipos de partículas, mostrando que a mistura de dois componentes não interagiu para influenciar na absorção de água em duas horas. A interação cúbica foi significativa e negativa, o que permite concluir que a absorção de água em duas horas foi menor com a mistura destes três materiais do que o esperado pela simples soma da absorção de água de cada componente puro.

Para o inchamento em espessura em 24 horas, o bambu apresentou estimativas mais elevadas. Os coeficientes das interações quadráticas foram todos significativos, no entanto, com sinais diferentes. A mistura de bambu com erva-mate e bambu com pinus apresentaram interação negativa, pois contribuíram para a redução do percentual de inchamento, contudo, a mistura de erva-mate com pinus apresentou interação positiva. Na mistura dos três tipos de partículas, a interação não foi significativa.

Para a absorção de água em 24 horas, constatou-se estimativas mais elevadas para os materiais bambu e erva-mate. Os coeficientes das interações quadráticas foram significativos para as misturas bambu com erva-mate (negativa) e erva-mate com pinus (positiva). A interação cúbica da mistura destes três materiais foi significativa e positiva, o que permite concluir que sua absorção de água em 24 horas foi maior do que o esperado em relação a simples soma da absorção de água de cada componente puro.

A resistência ao módulo de ruptura do pinus apresentou as maiores estimativas, sendo significativamente maior em relação ao bambu e à erva-mate. Os coeficientes das interações quadráticas e cúbica foram significativos e positivos, com exceção da mistura entre erva-mate e pinus, que foi não significativa.

O módulo de elasticidade dos painéis de pinus e os de bambu apresentaram as maiores estimativas, sendo significativamente maiores em relação aos de erva-mate. Os coeficientes das interações quadráticas foram significativos e positivos, para as misturas bambu com erva-mate e bambu com pinus. Já a interação cúbica foi significativa e positiva.

A tração perpendicular à superfície apresentou maiores estimativas para a erva-mate, em contraposição à de bambu. O coeficiente da interação quadrática foi significativo e positivo na mistura de bambu com pinus e houve interação tripla e positiva.

Para a dureza Janka as maiores estimativas foram observadas para pinus. Os coeficientes das interações quadráticas foram todos significativos, sendo positivos. Na mistura dos três tipos de partículas, a interação tripla não foi significativa.

A existência da camada de sílica na casca do bambu, revestida por cera e substâncias químicas hidrofóbicas, ou seja, com capacidade reduzida de interagir com a água, não inibiu a ocorrência dos maiores valores de inchamento e absorção de água, em painéis puros. Contudo, na mistura de bambu com erva-mate, o inchamento foi o menor do experimento. Na Tabela 7 são apresentadas as diferenças percentuais entre os valores reais e os estimados para os ensaios de teor de umidade, densidade aparente, inchamento em 2 e 24 horas e a absorção de água em 2 e 24 horas.

Tabela 7. Diferença percentual entre o valor real e o estimado nas propriedades físicas

Table 7. Percentage difference between actual and estimated physical properties

Trat.	Bambu	Erva-mate	Pinus	Dap (%)	TU (%)	IN2h (%)	AA2h (%)	IN24h (%)	AA24h (%)
1	100	0	0	-2,62	-0,53	-0,09	0,09	0,10	0,02
2	0	100	0	-2,62	-0,22	-0,24	-0,09	0,30	0,00
3	0	0	100	2,39	-0,37	-0,42	-0,45	0,05	-0,16
4	50	50	0	-2,52	-6,37	-5,89	1,71	6,99	-3,15
5	0	50	50	-0,11	-3,48	3,53	-0,17	-0,94	-1,51
6	50	0	50	0,00	-0,42	-9,35	-10,41	6,94	0,37
7	33,3	33,3	33,3	2,42	-4,02	-3,01	-2,13	-4,78	-2,05

Trat. = Tratamento; TU = Teor de umidade (%); Dap = Densidade aparente (%); IN = Percentual de Inchamento em 2 e 24 h (%); AA = Absorção de Água em 2 e 24 h (%).

Verifica-se que os valores estimados foram semelhantes aos valores reais verificados nos ensaios físicos, com variações pontuais mais significativas nas misturas.

Na Tabela 8 são apresentadas as diferenças percentuais entre os valores reais e os estimados dos ensaios mecânicos de MOR e MOE (flexão estática), tração perpendicular e dureza. Num contexto geral, os resultados dos parâmetros estimados pelo planejamento de misturas foram semelhantes aos valores reais verificados nos ensaios mecânicos, em especial, para o MOE. Contudo, as maiores variações foram verificadas para resistência à tração, principalmente nas misturas contendo erva-mate.

Tabela 8. Diferença percentual entre o valor real e o estimado das propriedades mecânicas.

Table 8. Percentage difference between the actual value and the estimated mechanical properties.

Tratamento	Bambu	Erva-mate	Pinus	MOR (%)	MOE (%)	RT (%)	DJ (%)
1	100	0	0	0,00	0,00	-2,04	-0,07
2	0	100	0	0,17	0,00	2,17	0,07
3	0	0	100	-0,15	0,00	6,67	0,09
4	50	50	0	-1,23	0,04	32,69	2,05
5	0	50	50	6,53	0,00	28,57	0,90
6	50	0	50	0,41	-0,01	2,91	-1,53
7	33,3	33,3	33,3	2,11	-0,70	22,55	-6,61

MOR = Módulo de Ruptura; MOE = Módulo de Elasticidade; RT = Resistência à Tração; DJ = Dureza Janka.

Para melhor visualização das variações causadas pelas características de cada tipo de material nas propriedades dos painéis HDP, na Figura 4 são apresentados os gráficos ternários das propriedades físicas dos painéis em função das misturas dos três componentes.

Na Figura 4A verifica-se, pelas linhas formadas, a ocorrência de valores inferiores de densidade nos corpos-de-prova dos painéis puros de bambu e erva-mate, contudo ao misturar estes materiais numa única composição, a densidade é aumentada. As maiores densidades foram constatadas no painel puro de pinus e nas misturas de erva-mate com pinus e dos três materiais. Por fim, o maior valor de densidade foi verificado na mistura entre erva-mate e pinus. Esse fato se deve à interação entre a reduzida densidade destes materiais e a geometria das partículas de erva-mate, possibilitando maior grau de compressão durante o processo de produção do painel.

Na Figura 4B as linhas formadas demonstram relativa semelhança de umidade entre os painéis puros de bambu e erva-mate que, ao serem misturados, tem seu teor de umidade reduzido, sendo estes os tipos de painéis que apresentaram os menores teores de umidade. Por outro lado, ao ser adicionado pinus nas diferentes misturas, constata-se aumento no teor de umidade, contudo ainda com valores inferiores ao seu painel puro.

Os ensaios de inchamento e absorção de água fornecem indicações a respeito das condições de adesão e de resistência das partículas que constituem o painel, ao serem submetidos à imersão em água. Na Figura 4C constatou-se que os painéis de pinus puro e naqueles de misturas nos quais ele faz parte da composição, que ocorreram valores reduzidos de inchamento em espessura em duas horas. Por esta razão, pode-se afirmar que a espécie *Pinus taeda* possui boas propriedades para produção de painéis submetidos à condição severa de umidade, pois apresenta reduzida variação dimensional quando submetidos à imersão em curto período. Os

valores mais elevados de inchamento em espessura em duas horas ocorrem para o bambu e em seguida para erva-mate, contudo, a mistura destes elementos resultou no menor valor.

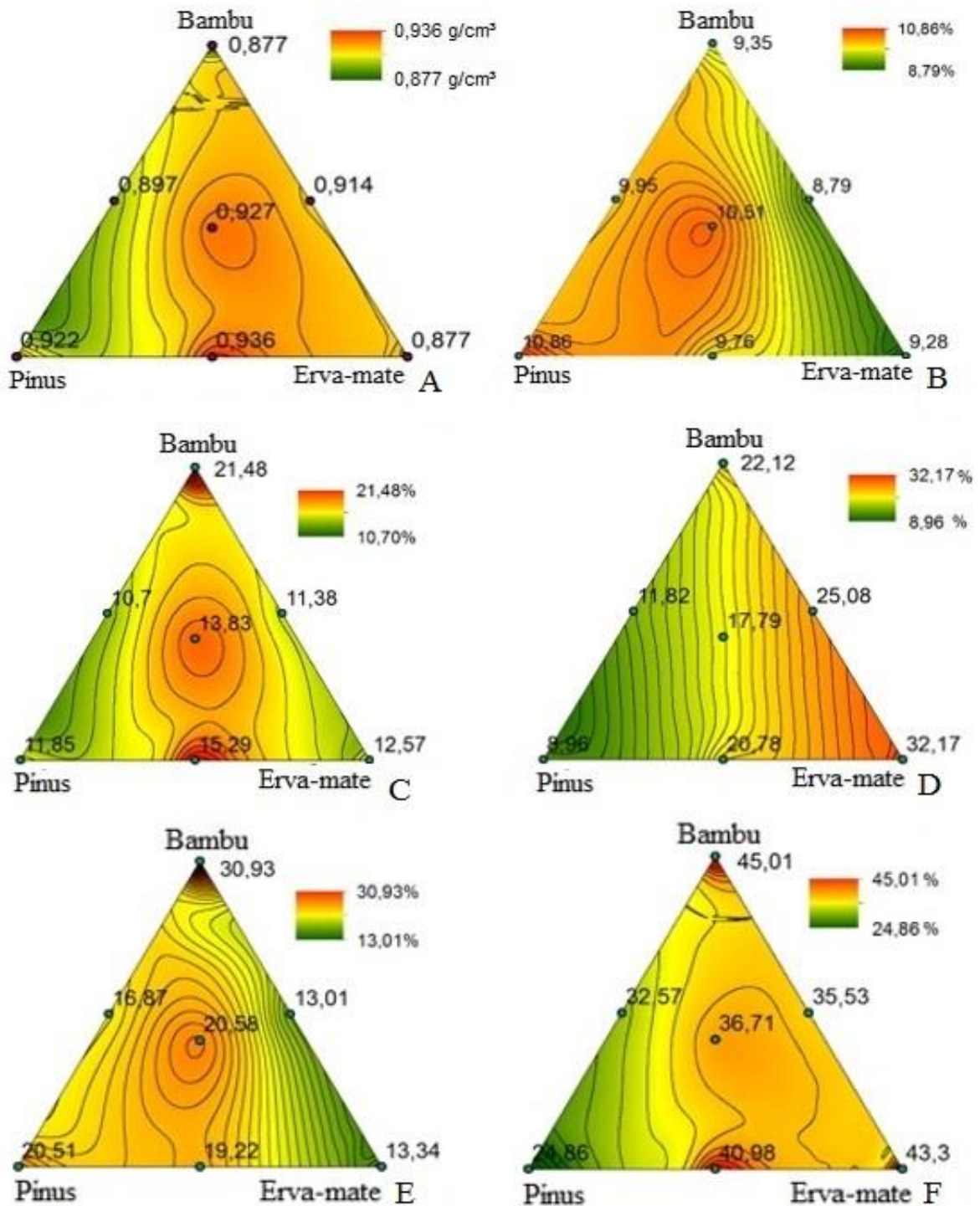


Figura 4. Propriedades físicas dos painéis de alta densidade (HDF). A) Densidade aparente; B) Teor de umidade; C) Inchamento em espessura (2h); D) Absorção de água (2h); E) Inchamento em espessura (24h); F) Absorção de água (24h).

Figure 4. Physical properties of high density panels (HDF). A) Apparent density; B) Moisture content; C) Swelling in thickness (2h); D) Water absorption (2h); E) Thickness swelling (24h); F) Water absorption (24h).

Na Figura 4D são mostrados valores inferiores de absorção de água em duas horas, nos painéis puros de pinus ou nas suas misturas. Os valores mais elevados de absorção ocorreram nos painéis puros de erva-mate e em seguida nos de bambu. Os gráficos ternários analisados demonstraram elevada variação de inchamento e absorção de água em duas horas de imersão, entre as espécies, em especial com relação ao pinus puro ou como composição de mistura.

Com relação ao inchamento em 24 horas de imersão em água (Figura 4E), pode-se afirmar que o uso de partículas de palitos de erva-mate proporcionou propriedades satisfatórias para produção de painéis, pois permitiu a redução da variação dimensional, inclusive com valores inferiores ao verificado para o pinus, espécie tradicionalmente utilizada na produção de painéis.

Na Figura 4F foram verificados valores inferiores de absorção de água nos painéis puros de pinus. Além disso, os painéis com pinus presente na composição apresentaram absorção de água inferior aos com material puro das espécies erva-mate e bambu, contudo, ao misturá-los numa composição única, o teor foi reduzido significativamente.

Desta forma, observou-se que o bambu apresentou elevados percentuais, tanto para inchamento como para absorção de água. Isto pode ser atribuído ao fato da fibra de bambu não ter proporcionado uma boa colagem, permitindo maior absorção de água e aumento das dimensões. Para a erva-mate, constatou-se reduzido inchamento em espessura, mas, elevada absorção de água. Em relação ao pinus, constatou-se o menor valor para absorção de água.

Na Figura 5, são apresentados os gráficos ternários das propriedades mecânicas dos painéis em função das misturas dos três componentes. Para a resistência e rigidez em flexão estática (Figuras 5A e 5B), a adição de partículas de pinus contribuiu para aumentar os valores de MOR e MOE. Esse efeito era esperado, pois este material apresenta elevados valores de resistência à flexão, superiores aos apresentados pelo bambu e ao material juvenil dos palitos de erva-mate, que apresentaram os menores valores destas propriedades.

Na Figura 5C é demonstrado que os menores valores de tração perpendicular ocorreram nos painéis puros de bambu e pinus e em sua correspondente mistura, contudo, os valores máximos ocorreram na mistura dos três componentes.

Na Figura 5D observa-se que todas as composições de misturas forneceram painéis com dureza superior ao do painel puro de pinus. Também é importante destacar que a mistura de bambu e erva-mate, que individualmente apresentaram os menores valores para dureza, quando misturados não diferiram estatisticamente dos maiores valores (Tabela 5). Além disso,

apesar do painel puro de bambu apresentar o menor valor desta propriedade, quando misturado com pinus apresentou o maior valor entre todos os painéis.

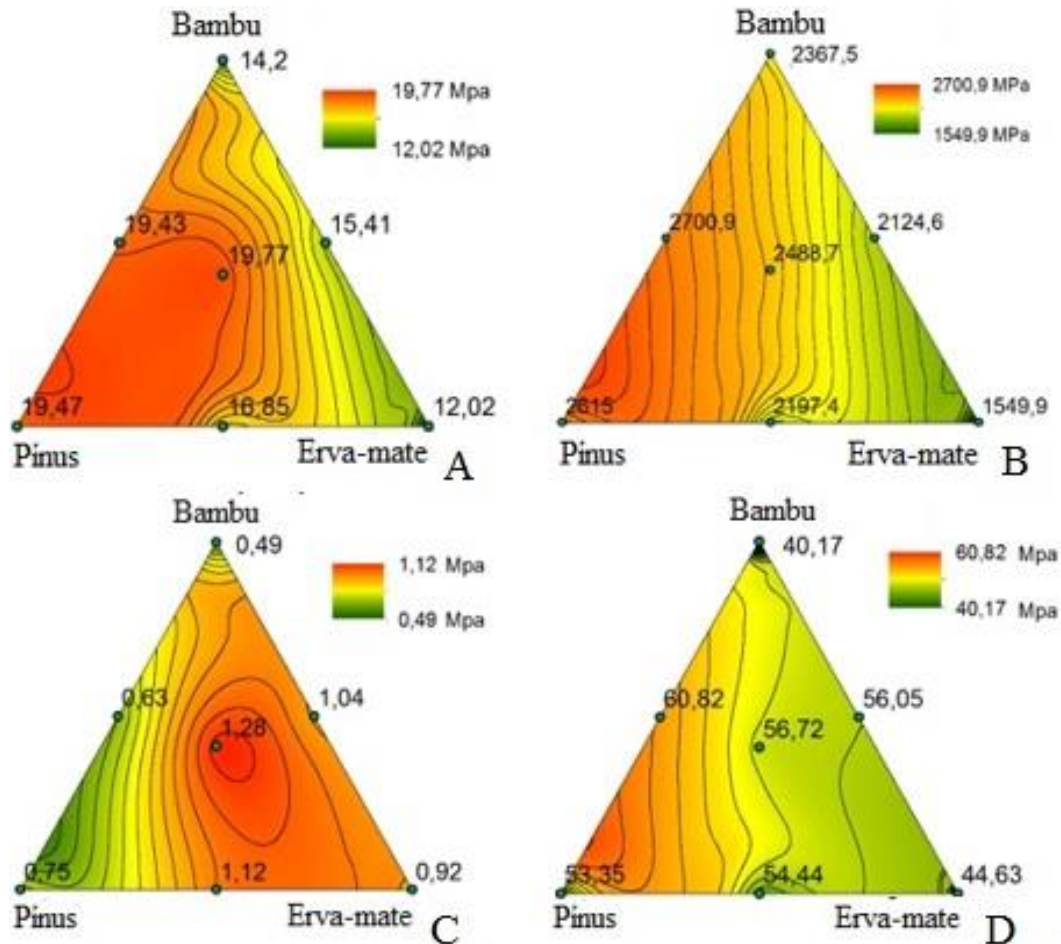


Figura 5. Propriedades mecânicas dos painéis de alta densidade (HDF). A) Módulo de ruptura em flexão estática (MOR); B) Módulo de elasticidade em flexão estática (MOE); C) Resistência à tração perpendicular; D) Dureza Janka.

Figure 5. Mechanical properties of high density panels (HDF). A) Modulus of rupture in static bending (MOR); B) Modulus of elasticity in static bending (MOE); C) Perpendicular tensile strength; D) Janka hardness.

Conclusões

Os painéis confeccionados com diferentes materiais apresentaram propriedades físicas de inchamento e absorção de água, que não atenderam ao parâmetro de painéis de alta densidade, classe H1 da norma ANSI A208.1. Contudo, os parâmetros de densidade e teor de umidade se adequaram às exigências da norma.

Estes painéis, nas diferentes composições de misturas e ensaios, apresentaram propriedades mecânicas satisfatórias. Em especial, as misturas de bambu com erva-mate e erva-mate com pinus para tração perpendicular à superfície do painel (ou ligação interna), o mesmo

para o painel puro de erva-mate e o de bambu com pinus para MOR e MOE, além da mistura tripla, para MOR e tração perpendicular; já para dureza, todas as misturas tiveram resultados satisfatórios. Os painéis confeccionados com estas misturas atenderam as especificações da norma ANSI A208.1.

A modelagem de misturas demonstrou que a densidade, teor de umidade, inchamento (2 e 24 horas), absorção de água (2 horas), a resistência à flexão (MOR e MOE) e resistência à tração, são explicadas pelo modelo cúbico, enquanto a absorção de água (24 horas) e a dureza são explicadas pelo modelo quadrático.

A geometria das partículas, dos diferentes materiais analisados, influenciou a resistência mecânica e rigidez dos painéis confeccionados.

Os resultados obtidos permitem classificar os painéis como de alta densidade, podendo ser utilizados como elementos estruturais, pisos e demais aplicações que requerem as mesmas propriedades físicas e mecânicas.

Os painéis desenvolvidos nesse estudo atendem ao conceito de produto ecoeficiente por serem produzidos a partir de resíduos e por possibilitar usos diversos em diferentes ambientes.

Agradecimentos

O presente trabalho foi realizado com o apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de financiamento 001.

Referências bibliográficas

AMERICAN NATIONAL STANDARDS INSTITUTE (ANSI). Mat-formed wood particleboard: Specification; National Particleboard Association, **ANSI A208.1-1993**, Gaithersburg (1993).

AMERICAN NATIONAL STANDARDS INSTITUTE (ANSI). Particleboard; Composite Panel Association, **ANSI A208.1**, Gaithersburg (1999).

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). Standard test methods for evaluating properties of wood-base fiber and particle panel materials, **ASTM D 1037-06**, West Conshohocken, Pa., Philadelphia. U.S.A, 2006. 30 p.

ARRUDA, L. M.; DEL MENEZZI, C. H. S.; TEIXEIRA, D. E.; DE ARAÚJO, P. C. Lignocellulosic composites from brazilian giant bamboo (*Guadua magna*) Part 1: properties of resin bonded particleboards. **Maderas, Ciencia y tecnologia**, v. 13, n. 1, p. 49-58, 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). Chapas de Madeira Aglomerada, Parte 2: Requisitos, **NBR 14810-2**, Rio de Janeiro (2002).

- BIANCHE, J. J.; CARNEIRO, A. C. O.; VITAL, B. R.; PEREIRA, F. A.; SANTOS, R. C.; SORATTO, D. V. Properties of particleboards fabricated with eucalyptus (*Eucalyptus urophylla*), parica (*Schizolobium amazonicum*) and vassoura (*Sida spp.*) particles. **Cerne**. v. 18, n. 4, p. 623-630, 2012.
- CALEGARI, L.; HASELEIN, C. R.; SCARAVELLI, T. L.; SANTINI, E. J.; STANGERLIN, D. M.; GATTO, D. A.; TREVISAN, R. Desempenho Físico-Mecânico de painéis fabricados com bambu (*Bambusa vulgaris* Schr.) em combinação com madeira. **Cerne**, Lavras, v. 13, n.1, p. 57-63, 2007. Disponível em: <<http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=74413108>>. Acesso em em 13 de nov. de 2017.
- CARVALHO, A. G.; ANDRADE, B. G.; CABRAL, C. P. T.; VITAL, B. R. Efeito da adição de resíduos de poda da erva-mate em painéis aglomerados. **Revista Árvore**, v. 39, n.1, p. 209-214, 2015. Doi: 10.1590/0100-67622015000100020
- COMMERCIAL STANDARD (CS). Mat formed wood particleboard, **CS 236-66**, 1968.
- CRAVO, J. C. M.; SARTORI, D. de L.; FIORELLI, J.; BALIEIRO, J. C. de C.; SAVASTANO JUNIOR, H. Painel aglomerado de resíduos agroindustriais. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 25, n. 3, p. 721-730, 2015.
- DEL MENEZZI, C. H. S., SOUZA, M. R., GONÇALEZ, J. C. Fabricação e avaliação tecnológica da chapa aglomerada de mistura de *Eucalyptus urophylla* T. S. Blake e *Pinus oocarpa* Schiede. **Revista Árvore**. v. 20, n. 3, p. 371-379, 1996.
- EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION (CEN). Determinación del módulo de elasticidad en flexión y de la resistencia a la flexión, **EN 310:1993**, Madrid, 1993. 12 p.
- EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION (CEN). Tableros de partículas - especificaciones, **EN 312:2003**, Madrid, 2003. 10 p.
- EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION (CEN). Particleboards and Fibreboards; Determination of Swelling in Thickness after Immersion in Water, test Method, **EN 317-2005**, Brussels, 2005. 10 p.
- EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION (CEN). Determinación de la resistencia a la tracción perpendicular a las caras del tablero. **EN 319:1993**. Madrid, 1993. 10 p.
- EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION (CEN). Determinación de la densidad. **EN 323:1993**, Madrid, 1993. 10 p.
- EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION (CEN). Wood-based Panels - Determination of Moisture Content, test Method. **EN 322:2005**, Brussels, 2005.
- GUIMARÃES JR., J. B.; MENDES, L. M.; MENDES, R. F.; MORI, F. A. Painéis de madeira aglomerada de resíduos da laminação de diferentes procedências de *Eucalyptus grandis*, *Eucalyptus saligna* e *Eucalyptus cloeziana*. **Cerne**, v. 17, n. 4, p. 443-452, 2011.
- GUIOTOKU, M.; LAZARIS, V.; DALLAGO, R. M.; MAGALHÃES, W. L. E. Utilização de Palitos de Erva-Mate na Produção de Painéis de Aglomerado. Comunicado Técnico 214. **Embrapa Florestas**. Colombo, PR, Dezembro, 2008. 6 p.
- HASELEIN, C. R.; CALEGARI, L.; BARROS, M. V.; HACK, C.; HILLIG, É.; PAULESKI, D. T.; POZZERA, F. Resistência mecânica e à umidade de painéis aglomerados com partículas de madeiras de diferentes dimensões. **Ciência Florestal**, v. 12, n. 2, p. 127-134, 2002.

HILLIG, É.; HASELEIN, C. R.; IWAKIRI, S. Modelagem de mistura de três espécies de madeiras na fabricação de painéis estruturais. **Floresta**, Curitiba, v. 33, n. 3, p. 311-320, 2003.

HIZIROGLU, S.; JARUSOMBUTI, S.; FUEANGVIVAT, V.; BAUCHONGKOL, P. Properties of bamboo-rice straw-eucalyptus composite panels. **Forest Products Journal**, Madison, v. 55, n. 12, p. 221-225, 2005.

IWAKIRI, S. **Painéis de madeira reconstituída**. Curitiba: FUPEF, 2005.

IWAKIRI, S.; CAPRARA, A. C.; SAKS, D. C. O.; GUI SANTES, F. P.; FRANZONI, J. A.; KRAMBECK, L. B. P.; RIGATTO, P. A. Produção de painéis de madeira aglomerada de alta densificação com diferentes tipos de resinas. **Scientia forestalis**. n. 68, p.39-43, 2005a.

IWAKIRI, S.; ANDRADE, A. S. de; CARDOSO JUNIOR, A. A.; CHIPANSKI, E. R.; PRATA, J. G.; ADRIAZOLA, M. K. O. Produção de painéis aglomerados de alta densificação com uso de resina melamina-uréia-formaldeído. **Cerne**, Lavras, v. 11, n. 4, p. 323-328, 2005b.

IWAKIRI, S.; ZELLER, F.; PINTO, J. A.; RAMIREZ, M. G. L.; SOUZA, M. M.; SEIXAS, R. Avaliação do potencial de utilização da madeira de *Schizolobium amazonicum* “Paricá” e *Cecropia hololeuca* “Embaúba” para produção de painéis aglomerados. **Revista Acta Amazonica**, Manaus, v. 40 n. 2, p. 303-308, 2010.

JENSEN, S. **Modelagem e investigação experimental dos processos de secagem e extração de erva-mate (*Ilex paraguariensis*)**. Tese (doutorado em Tecnologia de Alimentos), UFPR, Curitiba, 2011. 117p.

JORDÃO, D.; RAZERA, D.; TRIANOSKI, R. A geometria das partículas das fibras vegetais para aplicação no design de produtos. **Estudos em Design**, v. 25, n. 2, p. 50-65, 2017.

MATTOS, R. L.; GONÇALVES, R. M.; CHAGAS, F. B. Painéis de madeira no Brasil: panorama e perspectivas. **BNDES Setorial**, Rio de Janeiro, v. 27, p. 121-156, 2008.

MELO, R. R.; SANTINI, E. J.; HASELEIN, C. R.; STANGERLIN, D. M. Propriedades físico-mecânicas de painéis aglomerados produzidos com diferentes proporções de madeira e casca de arroz. **Ciência Florestal**, v.19, p.449-460, 2009.

MELO, R. R. de; STANGERLIN, D. M.; SOUSA, A. P. de; CADEMARTORI, P. H. G. de; SCHNEID, E. Propriedades físico-mecânicas de painéis aglomerados madeira-bambu. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.45, n.1, p. 35-42, 2015. <http://dx.doi.org/10.1590/0103-8478cr20120970>

MENDES, R. F.; MENDES, L. M.; GUIMARAES JUNIOR, J.B.; SANTOS, R. C. dos; BUFALINO, L. The adhesive effect on the properties of particleboards made from sugar cane generated in the distiller. **Revista de Ciências Agrárias**, Lisboa, v.32, n.2, p.209-218, 2009.

MENDES, R. F.; GUIMARAES JUNIOR, M.; RAABE, J.; SILVA, D. W.; TONOLI, G. H. D.; MENDES, R. F.; MENDES, L. M.; ABRANCHES, R. A. S.; SANTOS, R. C. dos; GUIMARAES JUNIOR, J.B. Painéis aglomerados com bagaço de cana em associação com madeira de eucalipto. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 38, n. 86, p. 285-295, 2010.

MENDES, R. F.; MENDES, L. M.; GUIMARÃES JÚNIOR, J. B.; SANTOS, R. C.; CÉSAR, A. A. S. Efeito da associação de bagaço de cana, do tipo e do teor de adesivo na produção de painéis aglomerados. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 22, n. 1, p. 161-170, 2012.

- MENDES, L. M. GUIMARAES JUNIOR, M.; RAABE, J.; SILVA, D. W.; TONOLI, G. H. D.; MENDES, L. M. Painéis aglomerados produzidos com bambu. p. 567-579. In: DRUMOND, P. M.; WIEDMAN, G. (Orgs.). **Bambus no Brasil: da biologia à tecnologia**. 1º ed., Rio de Janeiro: ICH, 2017. 655 p.
- MESQUITA, R. G. de A.; MENDES, L. M.; MENDES, R. F.; TONOLI, G. H. D.; MARCONCINI, J. M. Inclusão de feixes de sisal na produção de painéis MDP de eucalipto. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 43, n. 105, p. 75-82, 2015.
- MONTGOMERY, D. C. **Design and analysis of experiments**. 5º ed. New York: John Willey and Sons, 2001. 714 p.
- POLE COLA. Resina Melanina-ureia-formaldeído (MUF): considerações gerais para entendimento das qualidades do produto. Boletim técnico, **POLE COLA**, 2011. 3p.
- ROWELL, R. M.; HAN, J. S.; ROWELL, J. S. Characterization and Factors Affecting Fiber Properties. In: Elisabete Frollini et al. (ed.). **Natural polymers and agrofibers based composites**, Embrapa Instrumentação Agropecuária, São Carlos, 2000. p. 115.
- SANCHES, F. L.; HILLIG, É. IWAKIRI, S.; NAPOLI, L. M. Resistência de painéis aglomerados produzidos com mistura de madeira de espécies florestais tradicionais e não tradicionais. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 26, n. 2, p. 559-569, 2016.
- SORATTO, D. N.; CUNHA, A. B.; VITAL, B. R.; CARNEIRO, A. C. O.; COSTA, F. R. Efeitos da adição de cavaco com casca na qualidade de painéis MDP produzidos com *Eucalyptus* sp. **Ciência da madeira**, Pelotas, v. 4, n. 1, p. 46-59, 2013.
- SOUZA, J. T. **Resíduos madeireiros da indústria ervateira para produção de painéis MDP**. Tese (doutorado em ciências florestais), UFSM, 2016. 140 p.
- STANGERLIN, D. M.; MELO, R. F.; GARLET, A.; GATTO, D. A. Durabilidade natural de painéis aglomerados confeccionados com *Eucalyptus grandis* e *Bambusa vulgaris* em ensaio de apodrecimento acelerado. **Ciência Rural**, v.48, n.8, 1369-1374, 2011.
- VARANDA, L. D.; SOUZA, A. M.; ALMEIDA, D. H.; ICIMOTO, F. H.; FERRO, F. S.; CHRISTOFORO, A. L.; LAHR, F. A. R. Strength and Stiffness Properties of Particleboards. **International Journal of Composite Materials**, v. 4, n. 2, p. 150-156, 2014. Doi: 10.5923/j.comaterials.20140402.15
- WU, Q. Application of Nelson's sorption isotherm to wood composites and overlays. **Wood and Fiber Science**, Pennsylvania, v. 31, n. 2, p. 187-191, 1999.

Capítulo 5: AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES ENERGÉTICAS DE BAMBUS E COPRODUTOS DE ERVA-MATE

Resumo - A produção energética usando materiais lignocelulósicos alternativos tem se intensificado nos últimos anos, principalmente em função do significativo volume gerado nas diversas atividades agrícolas e florestais. Esse trabalho teve como objetivo determinar as propriedades energéticas da biomassa de três espécies de diferentes gêneros de bambu (*Bambusa vulgaris* Var. *Vittata*, *Dendrocalamus asper* e *Phyllostachys aurea*), além de galhos do processo de colheita e de palitos resultantes do processo de beneficiamento da *Ilex paraguariensis* (Erva-mate). Os valores médios de cada material foram comparados num delineamento inteiramente casualizado (DIC) com três repetições para cada ensaio, sendo determinados: granulometria, densidade básica (Db), teor de umidade (TU), teor de voláteis (Tv), teor de carbono fixo (Tcf), teor de cinzas (Tz), poder calorífico superior (PCS), poder calorífico inferior (PCI) e densidade energética básica (DEb). Concluiu-se que existem diferenças estatísticas significativas entre as espécies de bambu e dos materiais obtidos da Erva-mate, principalmente com relação à densidade básica e energética, ao teor de cinzas e à umidade. Os materiais se apresentaram com potencial para uso energético, devido à elevada densidade básica, densidade energética e poder calorífico.

Palavras-chave: Biomassa, teor de cinza, densidade energética, poder calorífico superior.

Evaluation of bamboo's energy properties and yerba mate residues

Abstract - Energy production using alternative lignocellulosic materials has intensified in recent years, mainly due to the significant volume generated in the various agricultural and forestry activities. The objective of this study was to determine the biomass energy properties of three bamboo species (*Bambusa vulgaris* Var. *Vittata*, *Dendrocalamus asper* and *Phyllostachys aurea*), as well as branches of the harvest and sticks resulting from the processing of *Ilex paraguariensis* (mate herb). The mean values of each material were compared in a completely randomized design (CRD) with three replicates for each test, determined: grain size, basic density, moisture content, volatile content, carbon content, ash content, upper calorific value, lower calorific value and basic energy density. It was concluded that there are significant statistical differences between the bamboo species and mate herb, mainly in relation to basic and energetic density, ashes content and humidity. The

materials presented with potential for energy use, due to the high basic density, energy density and calorific value.

Key words: Biomass, ash content, energy density, upper calorific value.

Introdução

O aumento do consumo global de energia nas últimas décadas, em especial, com a dependência de fontes baseadas em combustíveis fósseis tem elevado os níveis dos gases de efeito estufa na atmosfera. Devido às elevadas emissões de poluentes, estes combustíveis, gradativamente, vêm sendo substituídos por fontes de energia limpa (JUNG et al., 2015). Como resultado, ocorre uma busca por alternativas energéticas renováveis que possibilitem uma relação custo-benefício satisfatória entre o meio ambiente e o desenvolvimento. Nesse sentido, a biomassa lignocelulósica se apresenta como uma matéria-prima renovável, com elevado potencial energético e, em muitos casos, um recurso ainda pouco explorado, com diversificação e descentralização, para o fornecimento energético visando a autossuficiência em nível local e nacional.

A Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico (OCDE) classifica o Brasil na 13ª posição no ranking dos emissores de CO₂, apesar de possuir uma das matrizes energéticas com melhor compensação de monóxido de carbono do mundo. O país se comprometeu, por meio da Política Nacional sobre Mudança do Clima (PNMC), a reduzir em mais de 35% a sua emissão de gases de efeito estufa (GEEs) até o ano de 2020 (EPE, 2013). Além disso, a produção de resíduos de biomassa provenientes das atividades agroflorestais no Brasil é significativa, podendo causar problemas ambientais se a destinação desse material for mal conduzida, como a contaminação dos cursos d'água, a poluição do ar durante a queima a céu aberto e a ocupação de amplos espaços nas indústrias (PROTÁSIO et al., 2011).

O uso de resíduos de biomassa na produção sustentável de energia é uma parte importante dos conceitos de energia do futuro, especialmente por se caracterizar como recurso renovável, com propriedades atraentes como baixo custo de produção, baixa emissão de gases ácidos e independência em relação ao clima e mudanças sazonais, podendo ser armazenada e utilizada quando necessário, proporcionando uma contínua fonte de energia (CHOU et al., 2009; STELTE et al., 2011a; STELTE et al., 2012).

A fim de utilizá-la para fins energéticos, alguns ajustes nas suas propriedades devem ser realizados, como reduzir o elevado teor de umidade e padronizar o formato e tamanho de suas partículas (ALMEIDA et al., 2011). Em geral, as matérias-primas utilizadas atualmente para fins energéticos são, principalmente, resíduos de madeira (aparas e serragem), contudo, materiais

provenientes de diferentes espécies de gramíneas, resíduos agrícolas e da indústria alimentícia tornam-se cada vez mais importantes (STELTE et al., 2011b). O Brasil é um dos produtores mais proeminentes de resíduos de biomassa, com fontes de energia abundantes e renováveis (PAULA et al., 2011), possuindo muitas espécies de rápido crescimento que podem ser usadas como biomassa para energia, entre elas, diversas espécies de bambu e coprodutos da erva-mate.

O bambu não é considerado resíduo de indústria agrícola, mas é um material muito promissor para uso energético (RAMBO et al., 2015). Estas espécies são conhecidas pelo seu potencial energético, podendo ser utilizado no seu processamento, os mesmos equipamentos das espécies arbóreas (GUARNETTI; COELHO, 2014). Existem plantios comerciais de grandes dimensões no território brasileiro, com destaque para região nordeste, além de imensos fragmentos naturais no interior da Amazônia.

A erva-mate (*Ilex paraguariensis* A. St. Hil.) é explorada economicamente em cerca de 480 municípios dos estados do Paraná, Santa Catarina, Rio Grande do Sul e Mato Grosso do Sul, numa área superior a 110 mil hectares, cultivada em aproximadamente 180 mil propriedades rurais, possibilitando mais de 700 mil postos de trabalho (EMBRAPA, 2015). Esta cultura gera dois tipos de resíduos: i) galhos provenientes do processo de poda (CARVALHO et al., 2015); ii) palitos finos provenientes do processo de beneficiamento da erva *in natura* (GUIOTOKU et al., 2008; SOUZA et al., 2018). A produção brasileira de folhas *in natura* no ano de 2014 foi de 935 mil toneladas (IBGE, 2016), e deste material, em torno de 7% se tornam coproduto de palito ao final do processo de beneficiamento nas indústrias ervateiras, ou seja, aproximadamente 65 mil toneladas anuais, que podem ser utilizadas como uma alternativa de biomassa energética.

O teor de umidade e de cinza, além da densidade do material são variáveis que apresentam relação direta com seu potencial energético. Outras variáveis relevantes são: tamanho e formato de partícula, capacidade de absorção e eliminação de umidade, resistência ao processamento (otimizar a eficiência da produção e melhorar a qualidade do produto final). Além disso, é indispensável conhecer as propriedades que se relacionam com o desempenho energético da biomassa, tais como densidade básica, teor de carbono fixo, voláteis, cinzas e poder calorífico superior (SOARES et al., 2014; SANTOS et al., 2016). Este conjunto de variáveis são determinantes para que um material apresente potencial de uso energético. Neste contexto, o objetivo deste trabalho foi avaliar as propriedades energéticas de bambus e coprodutos de erva-mate, para determinar a qualidade destas biomassas para fins energéticos.

Material e métodos

Materiais e local de realização do Experimento

Neste estudo foram utilizadas amostras de diferentes materiais lignocelulósicos, mais especificamente, espécies de três diferentes gêneros de bambu (*Bambusa vulgaris* Var. *Vittata*, *Dendrocalamus asper* e *Phyllostachys aurea*) e coprodutos de Erva-mate (*Ilex paraguariensis*). Estes materiais lignocelulósicos alternativos foram picados num triturador moageiro marca Trapp 400 e posteriormente triturados em moinho de martelo da marca Willye TE 650.

O material obtido foi usado em ensaios laboratoriais para determinar a análise granulométrica, teor de umidade, densidade básica, análise química imediata, poder calorífico e densidade energética. Foram realizadas três repetições para cada amostra de biomassa, sendo que o montante total de material foi de cerca de 1 quilograma, conforme a Figura 1.

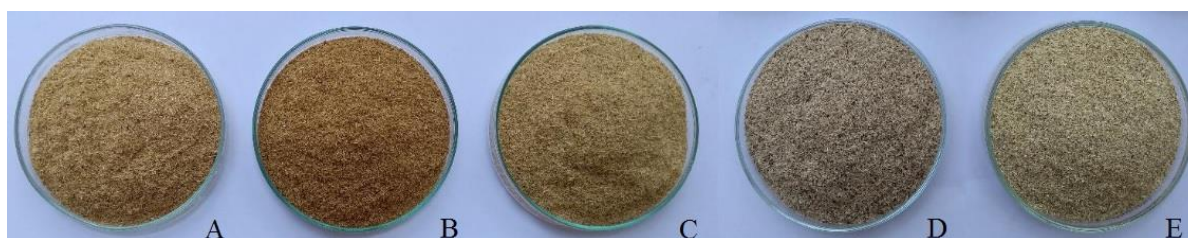


Figura 1. Materiais alternativos utilizados no experimento. Bambu: *Bambusa vulgaris*. Var. *Vittata* (A); *Dendrocalamus asper* (B); *Phyllostachys aurea* (C); Erva-mate (*Ilex paraguariensis*): dos galhos (D) e de palitos finos (E).

Caracterização da Biomassa

Análise granulométrica

A biomassa dos diferentes materiais foi submetida a peneiras de malha, sendo separado o material em três parâmetros (< 35, 35 – 60, > 60 *mesh*), o material utilizado para determinar a análise química imediata e poder calorífico foi o classificado entre 35 - 60 *mesh*, conforme determinações da Norma Brasileira Regulamentadora (NBR) 6923 (ABNT, 1981).

Teor de Umidade

Para determinar o teor de umidade das amostras, seguiu-se as determinações da norma ASTM E 870-82 (ASTM, 2006). Amostras em triplicata de cada tipo de material foram dispostas em cadinhos de porcelana e pesadas (valor inicial úmido de aproximadamente 2 gramas) em balança analítica de precisão, sendo em seguida colocadas em estufa a $103 \pm 2^\circ\text{C}$

até que a massa ficasse constante, obtendo-se a massa seca (peso final). Em virtude da diferença entre o peso inicial e final das amostras, foi obtido o teor de umidade por meio da equação 1:

$$Tu = \frac{m1 - m2}{m1} \times 100 \quad (1)$$

Tu: Teor de umidade da biomassa (%); m1: Massa inicial da biomassa (g); m2: Massa final da biomassa (g).

Densidade básica

Para determinar a densidade básica dos materiais analisados, foi utilizado o método hidrostático, por meio de imersão em água, conforme descrito na NBR 11941 (ABNT, 2003).

Análise química imediata e energética da biomassa

Teor de Voláteis

Para determinar o teor de voláteis, foram utilizadas as amostras secas *in natura* dos materiais alternativos utilizadas na determinação do teor de umidade, que foram introduzidos em Forno Mufla modelo Ni 1384, aquecido até 850°C, mantida enfiada por sete minutos, conforme determinação da norma ASTM E 870-82 (ASTM, 2006). Após este procedimento, as amostras foram acondicionadas em dessecador para resfriamento e pesagem. O teor de voláteis foi determinado pela equação 2:

$$Tv = \frac{m2 - m3}{m2} \times 100 \quad (2).$$

Tv: Teor de voláteis (%); m2: Amostra seca (g); m3: Amostra final, após exposição na mufla (g).

Teor de Cinzas

O material utilizado na determinação do teor de voláteis foi novamente levado ao Forno a uma temperatura de 750°C até atingir massa constante, conforme a ASTM E 870-82 (ASTM, 2006). Ao final, restaram somente cinzas dentro do cadinho, resultantes da combustão dos componentes orgânicos e oxidação dos inorgânicos. O teor de cinzas foi calculado por meio da equação 3:

$$Tz = \frac{m3 - m4}{m3} \times 100 \quad (3).$$

Tz: Teor de cinzas (%); m3: Massa seca da amostra (g); m4: Massa do resíduo após calcinação (g).

Teor de Carbono Fixo

O teor de carbono fixo (Tcf) foi determinado pela diferença entre os valores do teor de voláteis e teor de cinzas por meio da equação 4:

$$T_{cf} = 100 - (T_v + T_z) \quad (4).$$

Tcf: Teor de carbono fixo (%); Tv: Teor de voláteis (%); Tz: Teor de cinzas (%).

Poder Calorífico (Superior e Inferior)

A Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO) estabelece que o poder calorífico da madeira e da maioria dos coprodutos agrícolas (em especial, materiais com baixo teor de cinzas e umidade até 15%, ou seja, permitindo as análises das diferentes espécies de bambu e os galhos e palitos de erva-mate) pode ser calculado. Para tanto, o poder calorífico superior (PCS) e o poder calorífico inferior (PCI) são definidos com as fórmulas (ERIKSSON; PRIOR, 1990; DIAS et al., 2012):

$$PCS = 20 \times (1 - (T_z / 100) - (T_u / 100)) \quad (5).$$

$$PCI = 18,7 \times (1 - (T_z / 100)) - 21,2 \times (T_u / 100) \quad (6).$$

PCS: poder calorífico superior (MJ.Kg⁻¹); PCI: poder calorífico inferior (MJ.Kg⁻¹); Tz: teor de cinzas (%); Tu: teor de umidade (%).

O PCS e o PCI são usados como parâmetros de referência, especialmente em aplicações industriais. O uso das mesmas fórmulas para madeira e a maioria dos coprodutos agrícolas só é possível, em virtude do teor de hidrogênio ser de cerca de 6% em peso, numa base seca e isenta de cinzas.

Densidade energética

A densidade energética foi calculada dividindo o valor do poder calorífico superior pela densidade básica dos materiais analisados.

$$DE = (PCS / Db) / 1000 \quad (7).$$

DEb: densidade energética básica (GJ.m⁻³); PCS: poder calorífico superior (MJ.Kg⁻¹); Db: densidade básica (kg.m⁻³).

Análise dos dados

Foram testados os pressupostos de normalidade dos dados e a homogeneidade de variância, considerando os valores médios obtidos de três repetições, das propriedades físicas, químicas imediatas e energéticas, dos cinco materiais lignocelulósicos alternativos. Foi realizada a ANOVA no delineamento inteiramente casualizado (DIC), para então desenvolver comparação pelo teste de médias Tukey, a 5% de probabilidade de erro.

Resultados e discussão

Análise granulométrica

A análise granulométrica dos materiais é importante uma vez que influencia na densidade da biomassa. Na Tabela 1 é apresentada a distribuição granulométrica (em porcentagem) para as matérias-primas do estudo:

Tabela 1. Distribuição granulométrica (em porcentagem).

Matéria-prima	Mesh		
	< 35	35 - 60	> 60
<i>Bambusa vulgaris</i>	16,2	66,2	17,6
<i>Dendrocalamus asper</i>	18,1	65,5	16,4
<i>Phyllostachys aurea</i>	8,3	64,2	27,5
<i>Ilex paraguariensis</i> (galhos)	30,0	58,6	11,4
<i>Ilex paraguariensis</i> (palitos)	12,3	60,8	26,9

O percentual de material recomendado para uso segundo a NBR 6923, de 35 até 60 mesh, variou para as espécies de bambu e de erva-mate, sendo inferior no material obtido de galhos de erva-mate. Ainda, com relação à erva-mate é perceptível a inversão na proporção do segundo elemento mais volumoso, sendo maior o volume das partículas maiores nos galhos, enquanto que nos palitos ocorre maior formação de partículas pequenas (pó).

Propriedades físicas e análise química imediata

Na Tabela 2 estão apresentados os valores determinados para as propriedades físicas e a análise imediata dos materiais lignocelulósicos analisados neste estudo.

Tabela 2. Valores médios das propriedades físicas e da análise química imediata

Materiais	TU	Db	Tcf	Tv	Tz
<i>Bambusa vulgaris</i>	8,50 a	0,602 c	16,03 ab	81,42 ab	2,55 b
<i>Dendrocalamus asper</i>	8,93 ab	0,543 b	17,16 b	81,04 a	1,80 a
<i>Phyllostachys aurea</i>	9,25 b	0,647 c	15,94 ab	82,61 ab	1,45 a
<i>Ilex paraguariensis</i> (galhos)	10,67 c	0,422 a	15,08 a	83,26 b	1,66 a
<i>Ilex paraguariensis</i> (palitos)	8,99 b	0,391 a	16,44 ab	80,80 a	2,76 b

TU = teor de umidade (%); Db = densidade básica ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$); Tcf = teor de carbono fixo (%); Tv = teor de voláteis (%); Tz = Teor de cinzas (%). Médias seguidas de mesma letra não diferem pelo teste Tukey, a 5% de probabilidade de erro.

Na Figura 2 são ilustrados os valores médios e o desvio padrão das repetições realizadas para o teor de umidade e densidade básica.

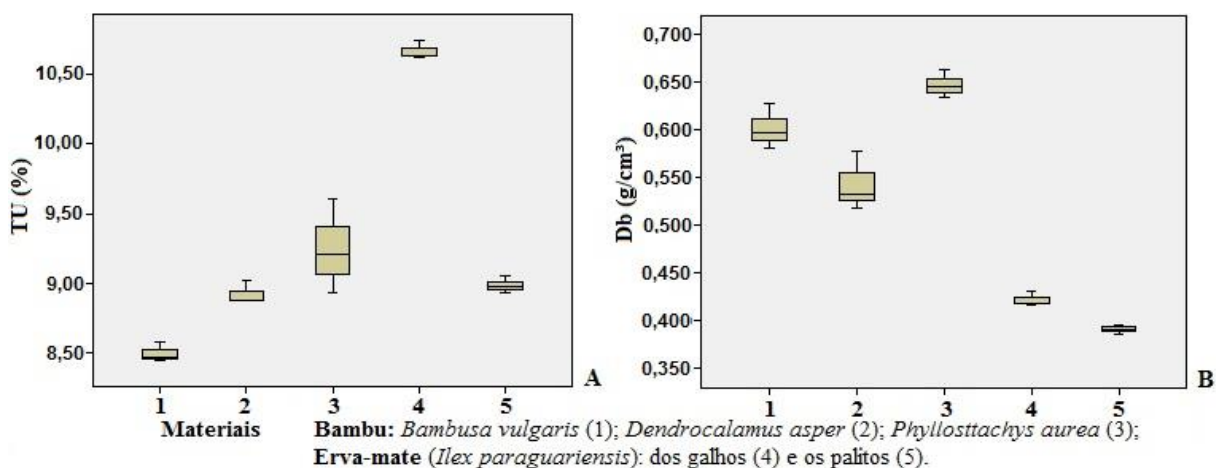


Figura 2. Teor de umidade (TU) (A) e Densidade básica (Db) (B)

O teor de umidade (TU) é um fator importante a ser observado pois, quanto menor for este valor, menor será a quantidade de energia gasta no processo de carbonização da madeira e maior o poder calorífico do material. O teor de umidade médio encontrado foi de 9,27% para os diferentes materiais em análise. Nos galhos de *Ilex paraguariensis* constatou-se teor de 15,1% superior ao valor médio, enquanto que o bambu *Bambusa vulgaris*, teve 91,7% do teor médio.

Apesar da reduzida diferença entre os valores médios de teor de umidade, foram encontradas diferenças estatísticas significativas entre os materiais, com valores superiores nos galhos de erva-mate. Contudo, todos os valores médios constatados foram inferiores ao teor de umidade máximo de 65 a 70% em base úmida, para queima de madeira (FURTADO et al., 2012). O teor de umidade indicado em materiais utilizados para a geração de energia não deve ultrapassar 30%, constituindo uma vantagem a utilização de teores inferiores em queima direta.

O teor de umidade relaciona-se diretamente com o tipo de resíduo e tempo de armazenamento. No setor madeireiro, resíduos de *Pinus taeda* e *Eucalyptus dunnii* foram avaliados por Brand et al. (2014), que constataram variação de 54 a 59% de umidade no material recém-chegado ao pátio, sendo de quatro meses o período de tempo de estocagem ideal, havendo perda da qualidade da biomassa após este período. Ao analisar o uso de resíduos de madeira para a geração de energia, foram encontrados valores médios de teor de umidade de 16,12% para a maravalha de *Pinus* spp (CALEGARI et al., 2005).

Em estudo realizado por Rousset et al. (2011), com colmos maduros da espécie *Bambusa vulgaris* com mais de três anos, os autores relataram valores de 20,2% de umidade. Lin et al. (2016) constataram valores entre 6,98 e 7,9% de TU para resíduos secos de bambu do gênero *Phyllostachys*. Para espécies arbóreas, Brand et al. (2014) constataram que os teores médios de umidade foram de 59 e de 54%, respectivamente, para as espécies *Pinus taeda* e *Eucalyptus dunnii* com casca e recém colhidos em diferentes épocas do ano no sul do Brasil.

Além do teor de umidade, uma propriedade física de fundamental importância é a densidade, por afetar diretamente diversas propriedades do material. Para Berndsen et al. (2010), a densidade específica do bambu varia com a idade e posição ao longo dos colmos, apesar de sua altura e diâmetro total serem atingidos em um curto período de tempo. Para a erva-mate é necessário considerar que os ramos finos são um material juvenil, ainda tenro e conseqüentemente com reduzida lignificação, já os galhos das podas, apesar de mais ‘maduros’, ainda não podem ser considerados material adulto, pois mesmo sendo mais rígidos e lignificados, certamente ainda não possuem todas as suas propriedades químicas e anatômicas estabelecidas.

Observou-se neste estudo que as biomassas de *Bambusa vulgaris* e *Phyllostachys aurea* apresentaram densidade básica similares, consideradas de média densidade. *Dendrocalamus asper* apresentou densidade básica inferior aos outros bambus. Com relação aos galhos e palitos de erva-mate a densidade foi semelhante e classificada como baixa.

Desta forma, os valores da densidade dos materiais analisados podem ser classificados como de baixa até média. Com relação ao bambu, Melo et al. (2015) constataram em colmos de *Bambusa vulgaris* com aproximadamente quatro anos de idade, valores de 0,630 g.cm⁻³. Vale et al (2017) obtiveram valores médios variando entre 0,505 e 0,609 g.cm⁻³ ao longo da altura de indivíduos com três anos de idade, enquanto Brito et al. (1987) relataram 0,687 g.cm⁻³. Santos et al. (2016) encontraram para *Bambusa vulgaris* var. *Vittata* 0,462 g.cm⁻³, enquanto para *Dendrocalamus asper*, os valores foram de 0,604 g.cm⁻³. Santin et al. (2017) encontraram valores médios de 0,40 g.cm⁻³ para densidade básica de galhos de poda de erva-mate de 12 até 36 meses.

Em comparação com espécies madeireiras utilizadas para geração de energia, a densidade de *Bambusa vulgaris* é semelhante àquelas relatadas por Protásio et al. (2011),

variando de 0,471 a 0,619 g.cm⁻³ para diferentes espécies de *Eucalyptus*. Para Santos et al. (2016) a densidade básica constatada foi de 0,482 g.cm⁻³ para *E. urograndis*.

Na Figura 3 está ilustrada a variação do desvio padrão e os valores médios dos teores da análise imediata (carbono fixo, voláteis e cinzas) dos materiais analisados.

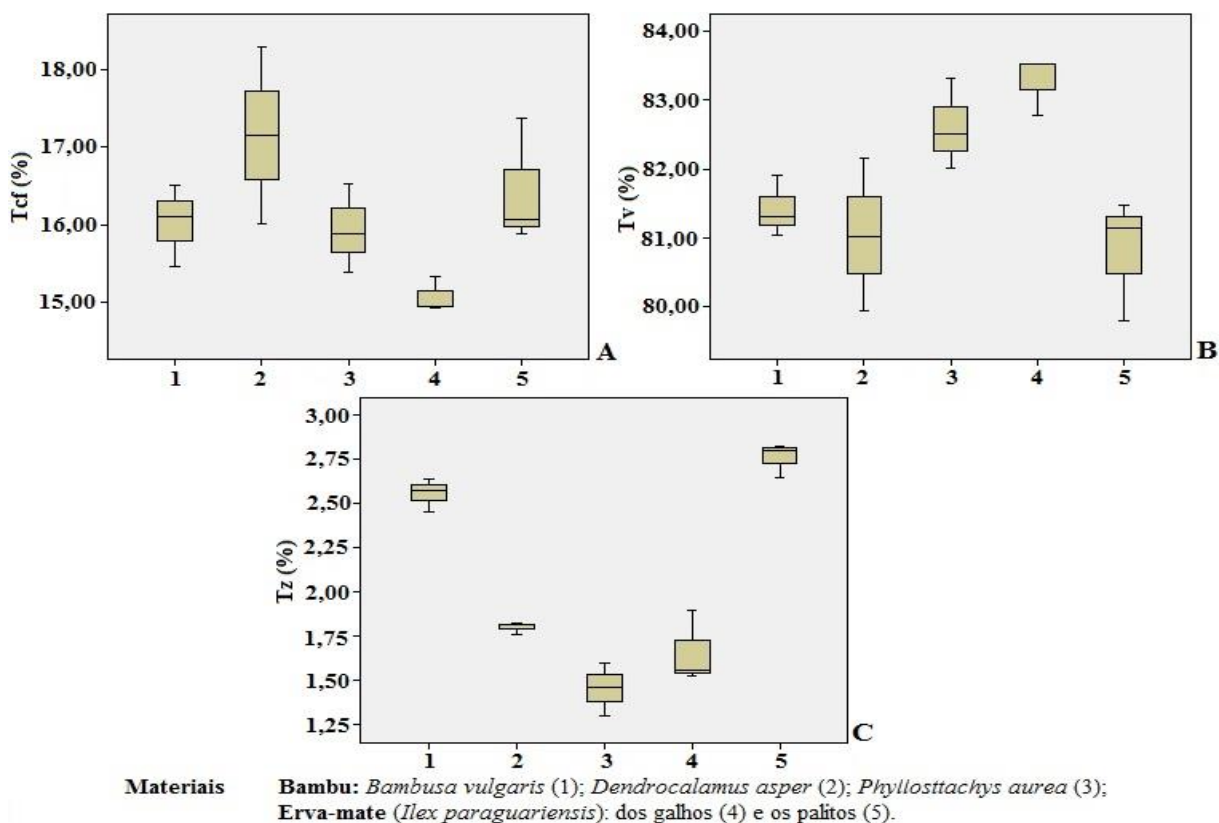


Figura 3. Teor de carbono fixo (A); Teor de voláteis (B); Teor de cinzas (C)

A quantidade de calor gerado pelo resíduo é estabelecida pelo teor de carbono fixo, sendo que quanto maior, mais lentamente o combustível irá queimar e com menor formação de chama (BRITO et al., 1987; SANTOS et al., 2016). O teor médio de carbono fixo encontrado foi de 16,13% para os diferentes materiais em análise. Nas espécies de bambu constatou-se teor de 1,5% superior à média, enquanto para a erva-mate foi 2,3% inferior.

Considerando dados da literatura, autores como Rousset et al. (2011), Moreira (2012) e Rambo et al. (2015), constataram, respectivamente, 17,75; 17,67 e 17,20% de teor de carbono fixo em diferentes espécies de bambu, todos valores superiores aos verificados nas espécies de bambu e nos galhos e palito de erva-mate analisados neste estudo. Sette Junior et al. (2016) avaliaram amostra do híbrido de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* e encontraram 17,5% de teor de carbono fixo.

Os voláteis têm um papel importante durante as etapas iniciais da combustão, sendo que a biomassa geralmente tem elevado teor (DEMIRBAS, 2004). A biomassa com alto teor de voláteis apresenta maior facilidade de incendiar e queimar, contudo isto pode causar dificuldade no controle do processo de combustão. Para Araújo et al. (2018), o aumento das temperaturas favorece a manutenção de menores teores finais de voláteis.

Entre as amostras analisadas neste estudo, os voláteis representaram a maior fração dos constituintes dos materiais lignocelulósicos, com teores relativamente semelhantes em todos os materiais. A maior variação ocorreu entre os palitos e galhos da erva-mate com 80,80 e 83,26%, respectivamente. Para as diferentes espécies de bambu, os valores médios não diferiram estatisticamente dos constatados nos palitos de erva-mate. Para amostra do híbrido de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla*, Sette Junior et al. (2016) encontraram 82,2 % de teor de voláteis.

O conteúdo de voláteis das espécies de bambu foi maior quando comparado aos valores observados por autores como Rambo et al. (2015), Moreira (2012) e Rousset et al. (2011), que constataram, respectivamente, 81,08; 78,14 e 80,13%.

O teor de cinzas depende diretamente da composição química da biomassa utilizada, sendo esta influenciada pela relação de minerais (cálcio, potássio, fósforo, magnésio, ferro, sódio, entre outros) que fazem parte da composição química do solo. Desta forma, a ocorrência de elevados teores de cinza num determinado material provoca a redução em seu teor de carbono fixo (VALE et al., 2007; SATER et al., 2011). O teor de cinzas também é diretamente influenciado pela quantidade da sílica presente no material, apresentando correlação negativa com o poder calorífico superior da biomassa.

Materiais com elevados teores de cinzas diminuem a eficiência do reator, já que sua biomassa original necessita de maiores quantidades de oxigênio para queima completa, além disso, da mesma maneira que a umidade, o teor de cinzas interfere no poder calorífico e causa perda de energia (HOFFMANN, 2010). A lenha é o combustível sólido mais utilizado em caldeiras, apresentando em torno de 1% de teor de cinzas, um bom índice por não prejudicar caldeiras e fornalhas (VALE et al., 2007).

Constatou-se variação estatística somente entre dois grupos de indivíduos analisados. O grupo dos menores teores de cinza é formado pelo bambu *Phyllostachys aurea*, os galhos da erva-mate e o bambu *Dendrocalamus asper*, com respectivamente 1,45; 1,66 e 1,80%, sendo que o grupo dos maiores teores, com valores superiores a 2,5% ocorreu no bambu *Bambusa vulgaris* e nos palitos da erva-mate. Araújo et al. (2018) observaram uma tendência de redução no teor de cinzas conforme aumentada a temperatura do processo.

Os valores de cinzas constatados em espécies de bambu por Rousset et al. (2011) e Rambo et al. (2015) foram respectivamente 2,12 e 1,71%, sendo que o teor de cinzas tende a aumentar com o aumento da idade, devido ao acúmulo de sílica (MOREIRA, 2012). Sette Junior et al. (2016) avaliaram amostra do híbrido de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* e encontraram 0,3% de teor de cinza, mesmo teor encontrado para este híbrido por Santos et al. (2016).

Com relação ao teor de cinzas, destacaram-se os palitos da erva-mate que apresentaram 2,76%, valor elevado para uma espécie arbórea. Esta maior quantidade de cinzas pode ser explicada em virtude deste material ser classificado como juvenil, com elevado teor de constituintes minerais inorgânicos, necessários para a nutrição das porções da planta com intensa atividade fisiológica.

Os combustíveis com baixo teor de carbono fixo e alto teor de materiais voláteis queimam mais rapidamente, exigindo curto período de tempo para decomposição integral, além disso, o teor de cinzas apresenta correlação negativa com o poder calorífico superior de uma biomassa. Desta forma, o conhecimento da composição imediata da biomassa, como teor de carbono fixo (Tcf), teor de material volátil (Tv) e teor de cinzas (Tz), constitui-se em informações fundamentais na determinação de seu poder calorífico.

Análise do poder calorífico

Na Tabela 3 são apresentados os valores observados para o poder calorífico e densidade energética, conforme método alternativo proposto pela FAO, visando comparar os principais parâmetros energéticos dos materiais lignocelulósicos analisados neste estudo.

Tabela 3. Determinação dos valores médios da análise energética

Materiais	PCS	PCI	DEb
<i>Bambusa vulgaris</i>	17,79 a	16,42 a	10,70 a
<i>Dendrocalamus asper</i>	17,85 a	16,47 a	9,69 b
<i>Phyllostachys aurea</i>	17,86 a	16,47 a	11,55 a
<i>Ilex paraguariensis</i> (galhos)	17,53 b	16,13 c	7,40 c
<i>Ilex paraguariensis</i> (palitos)	17,65 b	16,28 b	6,90 c

PCS = poder calorífico superior (MJ.kg⁻¹); PCI = poder calorífico inferior (MJ.kg⁻¹); Db = Densidade básica (g.cm⁻³); DEb = densidade energética básica (GJ.m⁻³).

O poder calorífico superior (PCS) indica a quantidade de energia liberada durante a transferência de calor relacionada à eficiência do processo, portanto, quanto maior for o PCS, mais eficiente será a combustão. Neste parâmetro, a água formada durante o processo é condensada, com recuperação deste calor, que é somado ao valor do PCS.

Além disso, o PCS é influenciado pelo teor de seus constituintes químicos. Ao considerar os materiais totalmente secos (0% teor de umidade), a lignina apresenta o maior PCI, com valores entre 26-27 MJ.kg⁻³, em comparação com 16 e 17,2 até 17,5 MJ.kg⁻³, respectivamente, da hemicelulose e da celulose. A variabilidade do poder calorífico anidro ocorre, em parte, devido à pequena, mas relevante variabilidade do conteúdo de hidrogênio (H) e à variabilidade muito maior do teor de cinzas no material (FRANCESCATO et al., 2012).

Na Figura 4 são mostrados os valores médios e o desvio padrão para o Poder calorífico superior, Poder calorífico inferior e Densidade energética básica dos materiais analisados.

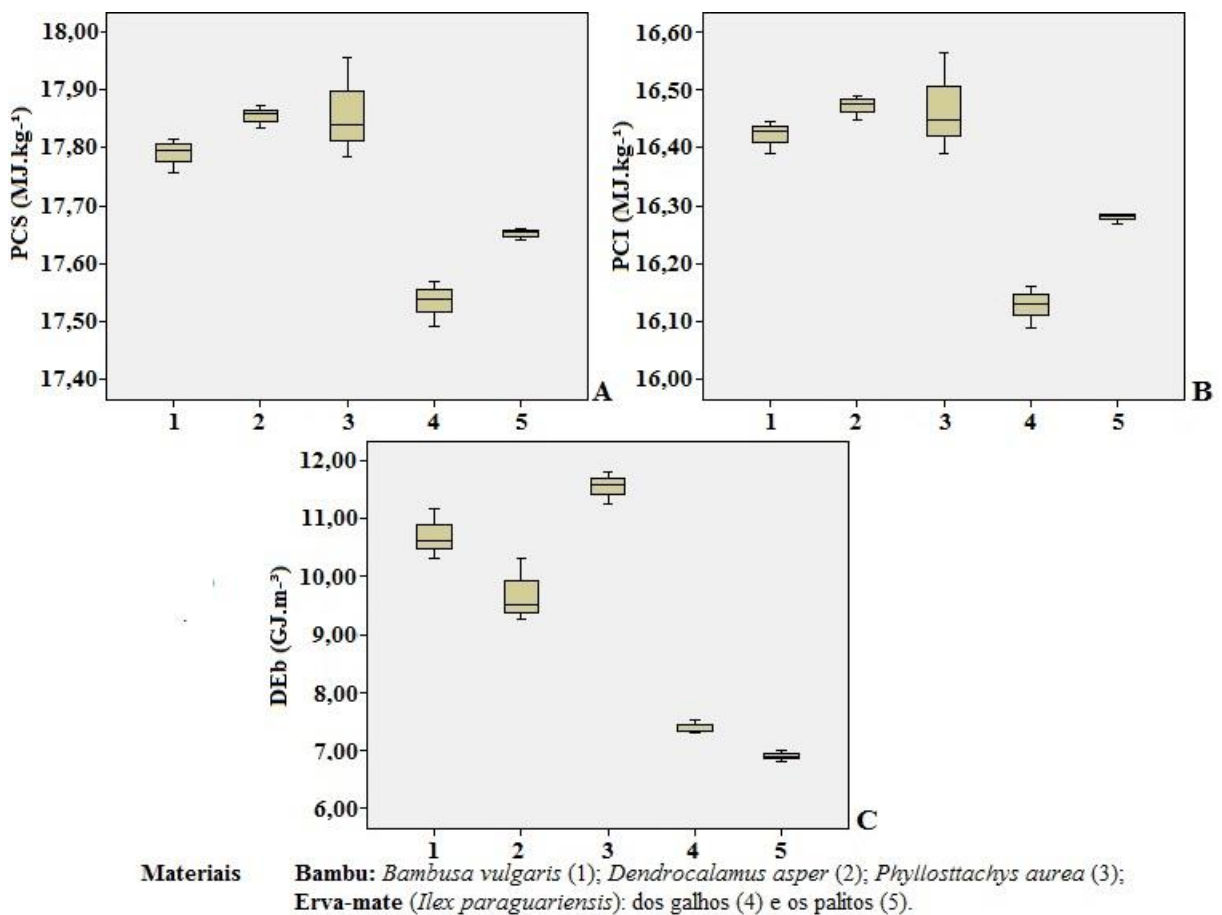


Figura 4. Poder calorífico superior (A); Poder calorífico inferior (B); Densidade energética básica (C).

Os valores médios encontrados para o PCS dos materiais analisado variou entre 17,53 até 17,86 MJ.Kg⁻¹, respectivamente para galhos da erva-mate e o bambu *Phyllostachys aurea*. O PCS médio das espécies de bambu foi de 17,83 MJ.kg⁻¹, semelhante aos valores de 17,65; 18,29; 16,74 e 18,32 MJ.kg⁻¹ encontrados por Brito et al. (1987), Moreira (2012), Guarnetti e Coelho (2014) e Rambo et al. (2015). Já Santin et al. (2017) encontraram valores médios de PCS de 18,94 MJ.kg⁻¹ para galhos de poda de erva-mate.

O poder calorífico da madeira seca de diferentes espécies varia na faixa entre 18,5 a 19 MJ.Kg⁻¹. Nas coníferas estes valores tendem a ser em torno de 2% superiores, e isto ocorre em função dos maiores teores de resina, ceras e óleos, mas, principalmente, de lignina (FRANCESCATO et al., 2012). Contudo, resíduos de madeiras na forma de maravalha das espécies *Pinus* sp e *A. angustifolia* apresentaram PCS de 17,23 e 17,32 MJ.Kg⁻¹, respectivamente (SCHMATZ et al., 2016).

O PCS da biomassa pode ser correlacionado com os resultados da análise química imediata (DIAS et al., 2012). Em geral, com o aumento de 1% no teor de carbono fixo, ocorre elevação de 0,39 MJ.kg⁻¹ no valor do PCS e com o aumento de 1% no teor de cinza, seu valor reduz em 0,2 MJ.kg⁻¹ (DEMIRBAS, 2004; PROTÁSIO et al., 2011). Isto justifica o fato do material obtido dos palitos da erva-mate, que possui o maior teor de cinzas, apresentar o segundo menor PCS, afinal, os elementos minerais não contribuem para melhor eficiência do processo de combustão, inclusive ocorrendo o oposto.

O Poder Calorífico Inferior (PCI) corresponde ao valor do PCS descontando-se a energia gasta para evaporar o hidrogênio de constituição do combustível na forma de água. O valor médio do Poder Calorífico Inferior (PCI) encontrado neste estudo variou de 16,13 até 16,47 MJ.kg⁻¹, respectivamente, entre os galhos da erva-mate e os bambus das espécies *Dendrocalamus asper* e *Phyllostachys aurea*. Para as espécies de bambu, o valor médio do PCI foi de 16,45 MJ.kg⁻¹, enquanto que para os diferentes materiais da erva-mate o valor médio foi de 16,20 MJ.kg⁻¹. Para Schmatz et al. (2016), o valor médio do PCI encontrado para as espécies *A. Angustifolia* e *Pinus* sp foi de 17,00 e 16,91 MJ.kg⁻¹, respectivamente. Para Moura et al. (2012), o valor médio do PCI de resíduos (pó de serra, costaneira e refilo) do processamento de madeira de *Pinus taeda* L. foi de 18,20 MJ.kg⁻¹.

A densidade energética básica (DEb) pode ser um indicador do potencial energético (MOREIRA, 2012), que corresponde ao produto entre o poder calorífico superior e a densidade básica, tendo variado de 6,90 até 11,55 GJ m⁻³, respectivamente, para palitos da erva-mate e bambu *Phyllostachys aurea*. Para as espécies de bambu, o valor médio foi de 10,65 GJ m⁻³ e de 7,15 GJ m⁻³ para os coprodutos da erva-mate.

Para Santin et al. (2017), a DEb encontrada foi de 7,57 GJ m⁻³ para os galhos de poda de erva-mate. Para Moura et al. (2012), o valor médio da densidade energética, considerando a densidade aparente de resíduos de colheita da floresta e do processamento (pó de serra, costaneira e refilo) da madeira de *Pinus taeda* L. foi de 2,98 e 4,81 GJ m⁻³, respectivamente.

Análise imediata e energética na literatura

O principal constituinte da biomassa para combustíveis é o carbono (RAMBO et al., 2015). Na análise química imediata, o maior teor de carbono fixo indica maior quantidade de massa orgânica rica em carbono, entretanto, quando o teor de cinzas aumenta, a fração orgânica diminui (JENKINS et al., 1998).

Santos et al. (2016) analisaram a espécie *Bambusa vulgaris* var. *Vittata* e constataram densidade básica de $0,462 \text{ g.cm}^{-3}$, teor de carbono fixo, voláteis e cinza de 22,8; 74,7 e 2,5%, respectivamente, e PCS de $19,52 \text{ MJ.kg}^{-1}$. Santos et al. (2016) analisaram a espécie *Dendrocalamus asper* e constataram densidade básica de $0,604 \text{ g.cm}^{-3}$, teor de carbono fixo, voláteis e cinzas de 23, 75 e 2,1%, respectivamente, com PCS de $18,95 \text{ MJ.kg}^{-1}$. Para Balduino et al. (2016), o *B. vulgaris* apresentou densidade básica $0,624 \text{ g.cm}^{-3}$, com 39% de teor de umidade, teor de carbono fixo, voláteis e cinzas de 15,26; 82,25 e 2,5%, respectivamente, e PCS de $19,13 \text{ MJ.kg}^{-1}$.

Vale et al. (2017) analisaram o *B. vulgaris* com três anos de idade e encontraram $0,645 \text{ g.cm}^{-3}$ para densidade básica, com teores médios de 15,33% de carbono fixo, 77,01% de voláteis, 7,45% de cinzas e $17,50 \text{ MJ.kg}^{-1}$ de PCS. A justificativa mais provável para o elevado teor de cinzas se deve ao manejo industrial, podendo ter ocorrido contaminação devido ao contato com o solo.

Lin et al. (2016) analisaram resíduos de bambu de espécies do gênero *Phyllostachys* e constataram teor de umidade variando entre 7,0 e 7,9%, teor médio de cinzas de 1,74% e PCS variando entre 17,94 e $18,23 \text{ MJ.kg}^{-1}$. Para Campos (2017), *Phyllostachys aurea* apresentou densidade específica de $0,63 \text{ g.cm}^{-3}$, teor de carbono fixo de 19,34%, 80,17% de voláteis e 0,49% de cinzas e PCS de $18,92 \text{ MJ.kg}^{-1}$. Para Rambo et al. (2015), a biomassa de bambu apresenta potencial para a produção de bioenergia, devido ao seu alto poder calorífico e baixo teor de umidade.

Vale et al. (2007) encontraram densidade a granel de $115,06 \text{ kg.m}^{-3}$ ao teor de umidade de 22,33 %, 83,19 % de material volátil, 0,34% de cinzas, 16,47% de carbono fixo, com PCS de $20,63 \text{ MJ.kg}^{-1}$ para maravalha de *Cedrelinga catenaeformis*.

Santin et al (2017) encontraram valores médios de teor de cinzas de 3,9% para galhos de poda de erva-mate. Os altos teores de cinzas contribuem para a redução do PCS da biomassa, já que o conteúdo de minerais, ou seja, os teores de cinzas não atuam no processo de combustão (BRAND, 2010). Isso condiz com os resultados deste trabalho, sendo que a biomassa *in natura* de *P. aurea* foi a espécie com menor teor de cinzas e maior PCS.

Considerando o uso energético da madeira, em geral, os teores são: voláteis entre 75 e 85%, carbono fixo entre 15 e 25% e cinzas inferior a 1% (BALDUINO et al., 2016). Portanto, os materiais analisados neste estudo apresentaram maior teor de cinzas e conteúdo volátil do que o

ideal, mas carbono fixo equivalente ao observado para diferentes espécies e grupos de madeira. Assim, estes materiais podem ser considerados de combustão rápida, onde a maior parte de sua massa é queimada na forma de gases e a menor proporção na forma sólida (carbono residual).

Neste estudo, a espécie mais indicada para uso energético, considerando o PCS, é o material lignocelulósico *in natura* da espécie *P. aurea*, apesar de não apresentar o maior teor de carbono fixo. Já os galhos da erva-mate apresentaram os menores resultados para uso energético, devido o menor teor de carbono fixo, mesmo com o teor de cinzas reduzido.

O controle das propriedades energéticas do material eleva sua eficiência e o torna mais competitivo frente a outras fontes de energia. Esse controle depende não somente do poder calorífico, mas do teor de umidade e teor de cinzas, além da densidade do material, dentre outras variáveis, como o percentual de voláteis, de carbono e hidrogênio, também da ocorrência de resinas, ceras, óleos, a variação nos teores de celulose, hemicelulose e, principalmente, de lignina.

Conclusão

O desempenho energético das espécies de bambu foi superior ao verificado para os materiais obtidos da erva-mate, considerando o poder calorífico superior e inferior.

Os galhos e palitos de erva-mate apresentaram poder calorífico e teor de umidade considerados adequados para materiais destinados ao processo de queima, porém apresentaram altos teores de cinzas e reduzida densidade.

A espécie *Phyllostachys aurea* teve o menor teor de cinzas, maior poder calorífico e maior densidade energética entre os diferentes materiais analisados.

Agradecimentos

O presente trabalho foi realizado com o apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de financiamento 001.

Referências bibliográficas

ALMEIDA, A. N.; ÂNGELO, H.; GENTIL, L. V. B.; SILVA, J. C. G. L. Demanda de briquete de madeira. **FLORESTA**, v. 41, n. 1, p. 73–78, 2011.

ARAÚJO, A. C. C.; COSTA, L. J.; BRAGA, P. P. C.; NETO, R. M. G.; ROCHA, M. F. V.; TRUGILHO, P. F. Propriedades energéticas da madeira e do carvão vegetal de *Cenostigma macrophyllum*: subsídios ao uso sustentável. **Pesquisa Florestal Brasileira**, Colombo, v. 38, e201701546, p. 1-9, 2018. doi: 10.4336/2018.pfb.38e201701546

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 6923**: Carvão vegetal - Amostragem e preparação da amostra. Rio de Janeiro, 1981.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 11941**: Determinação da densidade básica. São Paulo, 2003.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS - ASTM International. **ASTM E870-82**. Standard Test Methods for Analysis of Wood Fuels, United States, 2006.

BALDUINO JUNIOR, A. L.; BALDUINO, T. Y.; FRIEDERICHS, G.; CUNHA, A. B.; BRAND, M. A. Energetic potential of bamboo culms for industrial and domestic use in Southern Brazil. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 46, n. 11, 2016. Doi: 10.1590/0103-8478cr20160233

BERNSEN, R. S.; KLITZKE, R. J.; BATISTA, D. C.; NASCIMENTO, E. M.; OSTAPIV, F. Propriedades físicas do bambu-mossô (*Phyllostachys pubescens* Mazel ex H. de Lehaie) em diferentes idades e posições do colmo. **Floresta**, v. 40, n. 1, p. 183-192, 2010.

BRAND, M. A. **Energia de biomassa florestal**. Rio de Janeiro: Interciência, 2010, 114p.

BRAND, M. A.; MUÑIZ, G. I. B.; BRITO, J. O.; QUIRINO, W. F. Influência das dimensões da biomassa estocada de *Pinus taeda* L. e *Eucalyptus dunnii* Maiden na qualidade do combustível para geração de energia. **Revista Árvore**, v.38, n.1, p.175-183, 2014. Doi: 10.1590/S0100-67622014000100017

BRITO, J.O.; TOMAZELLO FILHO, M.; SALGADO, A. L B. Produção e caracterização do carvão vegetal de espécies e variedades de bambu. **IPEF**, n.36, p.13-17, 1987.

CARVALHO, A. G.; ANDRADE, B. G.; CABRAL, C. P. T.; VITAL, B. R. Efeito da adição de resíduos de poda da erva-mate em painéis aglomerados. **Revista Árvore**, v. 39, n.1, p. 209-214, 2015. Doi: 10.1590/0100-67622015000100020

CALEGARI, L.; FOELKEL, C. E. B.; HASELEIN, C. R.; ANDRADE, J. L. S.; SILVEIRA, P.; SANTINI, E. J. Características de algumas biomassas usadas na geração de energia no Sul do Brasil. **Biomassa & Energia**, v.2, n.1, p. 37-46, 2005.

CHOU, C.; LIN, S.; LU, W. Preparation and characterization of solid biomass fuel made from rice straw and rice bran. **Fuel Processing Technology**, v. 90, n. 7-8, p. 980-987, 2009. Doi: 10.1016/j.fuproc.2009.04.012.

DEMIRBAS, A. Combustion characteristics of different biomass fuels. **Progress in Energy and Combustion Science**, v. 30, n. 2, p. 219-230, 2004. Doi: 10.1016/j.pecs.2003.10.004.

DIAS, J. M. C. S.; SOUZA, D. T.; BRAGA, M.; ONOYAMA, M. M.; MIRANDA, C. H. B.; BARBOSA, P. F. D.; ROCHA, J. D. **Produção de briquetes e péletes a partir de resíduos agrícolas, agroindustriais e florestais**. Brasília: Embrapa, 2012. 132 p.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. **Sistema de Produção da Erva Mate. Soluções tecnológicas**. Embrapa Florestas, Colombo, PR, 2015. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/busca-de-solucoes-tecnologicas/-/produto-servico/2093/sistema-de-producao-de-erva-mate>>. Acesso em 16 de nov. 2018.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA - EPE. **Balanco energético nacional**: ano base 2012. Governo Federal, Brasília, DF, 2013.

ERIKSSON S.; PRIOR, M. **The briquetting of agricultural wastes for fuel**. Food and Agriculture Organization of the United Nations. 1990. Disponível em: <<http://www.fao.org/docrep/T0275E/T0275E03.htm>>. Acesso em: 27 nov. 2018.

FRANCESCATO, V.; ANTONINI, E.; BERGOMI, L. Z.; METSCHINA, C.; SCHNEDL, C.; KRAJNC, N.; KOSCIK, K.; GRADZIUK, P.; NOCENTINI, G.; STRANIERI, S. **Manual de**

combustíveis de madeira produção requisitos de qualidade comercialização. S.I: Associação Espanhola de Valorização Energética de La Biomasa, 2012. 82 p.

FURTADO, T. S.; FERREIRA, J. C.; BRAND, M. A.; NEVES, M. D. Correlação entre teor de umidade e eficiência energética de resíduos de *Pinus taeda* em diferentes idades. **Revista Árvore**, v.36, n.3, p.577-582, 2012.

GUARNETTI, R. L.; COELHO, S. T. Cogeração de eletricidade utilizando bambu no Brasil: aspectos técnicos, econômicos e ambientais. **Jornal Biomassa BR**, v. 3, n. 14, p.3-8, 2014.

GUIOTOKU, M.; LAZARIS, V.; DALLAGO, R. M.; MAGALHÃES, W. L. E. **Utilização de Palitos de Erva-Mate na Produção de Painéis de Aglomerado.** Comunicado técnico 214. Colombo: Embrapa Florestas, dezembro de 2008. 6 p.

HOFFMAN, B. S. **O ciclo combinado com gaseificação integrada e a captura de CO₂: uma solução para mitigar as emissões de CO₂ em termelétricas a carvão em larga escala no curto prazo.** 2010. 143 f. Dissertação (mestrado em Planejamento Energético), UFRJ, Rio de Janeiro, 2010.

IBGE. Produção Agrícola Municipal (PAM). **Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística.** Rio de Janeiro, 2016.

JENKINS, B.; BAXTER, L. L.; MILES, T. R. Combustion properties of biomass. **Fuel Processing Technology**, v. 54, p. 17-46, 1998.

JUNG, S. J.; KIM, S. H.; CHUNG, I. M. Comparison of lignin, cellulose, and hemicellulose contents for biofuels utilization among 4 types of lignocellulosic crops. **Biomass and Bioenergy**, v. 83, n. 1, p. 322-327, 2015.

LIN, L. D.; CHANG, F. C.; KO, C. H.; WANG, C. T. Bamboo-Derived Fuel from *Dendrocalamus latiflorus*, *Phyllostachys makinoi*, and *Phyllostachys pubescens* Waste. **BioResources**, v. 11, n. 4, p. 8425-8434, 2016.

MELO, R. R.; STANGERLIN, D. M.; SOUZA, A. P.; CADEMARTORI, P; H; G.; SCHNEID, E. Propriedades físico-mecânicas de painéis aglomerados madeira-bambu. **Ciência Rural**, [s.l.], v. 45, n. 1, p.35-42, jan. 2015. Doi: 10.1590/0103-8478cr20120970

MOREIRA, A.C.O. **Caracterização de *Bambusa vulgaris* Schard. exj.c. wendl. var. *vulgaris*, e dos resíduos de caldeira no processo de conversão térmica de energia.** Dissertação (mestrado em Engenharia Florestal). Universidade de Brasília, 2012. 61p.

MOURA, M. S.; SILVA, D. A.; ROCHADELLI, R.; SANTOS, R. C. Estimativa de poder calorífico e caracterização para uso energético de resíduos da colheita e do processamento de *Pinus taeda*. **FLORESTA**, v. 42, n. 2, p. 325 - 334, 2012.

PAULA, L.E.R.; TRUGILHO, P.F.; NAPOLI, A.; BIANCHI, M.L. Characterization of residues from plant biomass for use in energy generation, **Cerne**, v. 17, p. 237-246, 2011.

PROTÁSIO, T. P.; BUFALINO, L.; TONOLI, G. H. D.; COUTO, A. M.; TRUGILHO, P. F.; GUIMARÃES JÚNIOR, M. Relação entre o poder calorífico superior e os componentes elementares e minerais da biomassa vegetal. **Pesquisa Florestal Brasileira**, 31, 117, 2011. doi: 10.4336/2011.pfb.31.66.113

RAMBO, M.K.D.; SCHMIDT, F. L.; FERREIRA, M. M. C. Analysis of the lignocellulosic components of biomass residues for biorefinery opportunities. **Talanta**, v. 144, p. 696-703, 2015. Doi: 10.1016/j.talanta.2015.06.045

- ROUSSET, P.; AGUIAR, C.; LABBÉ, N.; COMMANDRÉ, J.-M. Enhancing the combustible properties of bamboo by torrefaction. **Bioresource Technology**, v. 102, n. 17, p. 8225–8231, 2011. doi:10.1016/j.biortech.2011.05.093
- SANTIN, D.; GONÇALVES SOBRINHO, M. B.; CARNEIRO, A. C. O.; BENEDETTI, E. L.; BARROS, N. F. Phosphorus fertilization and harvest intervals influence energetic and physical properties of briquettes and large branches of mate. **Revista Árvore**, v. 41, n. 1, e410110, 2017. Doi: 10.1590/1806-90882017000100010
- SANTOS, D. R. S.; SETTE JÚNIOR, C. R.; SILVA, M. F.; YAMAJI, F. M.; ALMEIDA, R. A. Potencial de espécies de Bambu como fonte energética. **Scientia Forestalis**, v. 44, n. 111, p. 751-758, 2016. Doi: dx.doi.org/10.18671/scifor.v44n111.21
- SATER, O.; SOUZA, N. D.; OLIVEIRA, E. A. G.; ELIAS, T. F.; TAVARES, R. Estudo comparativo da carbonização de resíduos agrícolas e florestais visando à substituição da lenha no processo de secagem de grãos de café. **Revista Ceres**, v. 58, n.6, p. 717-722, 2011.
- SCHMATZ, M. J.; SIQUEIRA, J. A. C.; NOGUEIRA, C. E. C.; SOUZA, S. N. M.; TOKURA, L. K.; MENEZES, K. L.; SANTOS, D. B. Evaluation of the gross and net calorific value of residues of wood pine and araucaria from reforestation. **African Journal of Agricultural Research**, v. 11, n. 41, p. 4157-4161, 2016.
- SETTE JUNIOR, C. R.; FREITAS, P. C.; FEITAS, V. P.; YAMAJI, F. M.; ALMEIDA, R. A. Production and characterization of bamboo pellets. **Bioscience Journal**, v. 32, n. 4, p. 922-930, 2016. Doi: [10.14393/BJ-v32n4a2016-32948](https://doi.org/10.14393/BJ-v32n4a2016-32948)
- SOARES, V. C.; BIANCHI, M. L.; TRUGILHO, P. F.; PEREIRA, A. J.; HOFLE, J. Correlações entre as propriedades da madeira e do carvão vegetal de híbridos de eucalipto. **Revista Árvore**, v. 38, n. 3, p. 543-549, 2014. DOI: 10.1590/S0100-67622014000300017
- SOUZA, J. T.; TALGATTI, M.; MENEZES, W. M.; HASELEIN, C. R.; SANTINI, E. J.; BELTRAME, R. Propriedades não destrutivas do MDP produzido com partículas de madeiras e de *Ilex paraguariensis*. **Scientia Forestalis**, v. 46, n. 119, 2018.
- STELTE, W.; CLEMONS, C.; HOLM, J. K.; SANADI, A. R.; AHRENFELDT, J.; SHANG, L.; HENRIKSEN, U. B. Pelletizing properties of torrefied spruce. **Biomass Bioenergy**, v.35, p. 4690-8, 2011a.
- STELTE, W.; HOLM, J. K.; SANADI, A. R.; BARSBERG, S.; AHRENFELDT, J.; HENRIKSEN, U. B. A study of bonding and failure mechanisms in fuel pellets from different biomass resources. **Biomass Bioenergy**, n. 35, p. 910-918, 2011b.
- STELTE, W.; SANADI, A. R.; SHANG, L.; HOLM, J. K.; AHRENFELDT, J. HENRIKSEN, U. B. Recent developments in biomass palletization - a review. **Bioresources**, n.7, p. 4451-90. 2012.
- VALE, A. T.; GENTIL, L. V.; GONÇALEZ, J. C.; COSTA, A. F. Caracterização energética e rendimento da carbonização de resíduos de grãos de café (*Coffea arabica* L.) e de madeira (*Cedrelinga catenaeformis* Duke). **Cerne**, v. 13, p. 416-420, 2007.
- VALE, A. T.; MOREIRA, A. C. O.; MARTINS, I. S. Avaliação do Potencial Energético de *Bambusa vulgaris* em Função da Idade. **Floresta e Ambiente**; 24, e00123314, 2017. Doi: <http://dx.doi.org/10.1590/2179-8087.123314>

CONCLUSÃO GERAL

Foram constatadas diferenças anatômicas entre espécies e que suas propriedades físico-mecânicas variam com a idade, também com relação à porção da haste (tanto no sentido vertical como transversal). Em geral, os bambus apresentam os parâmetros necessários para uso em diferentes produtos destinados a uso energético.

Os cavacos de bambu (*Phyllostachys aurea*) e os palitos de erva-mate (*Ilex paraguariensis*), foram picados e transformados em partículas que possibilitaram a produção de painéis de alta densidade, com razão de compactação em conformidade com as recomendações técnicas.

As misturas das partículas de bambu (*Phyllostachys aurea*), de palitos finos de erva-mate (*Ilex paraguariensis*) e de madeira de *Pinus taeda*, coladas com a resina Melamina-Ureia-Formaldeído (MUF), resultaram em painéis de alta densidade (HDP) que apresentaram, de modo geral, propriedades físico-mecânicas satisfatórias em comparação com as normas europeias e americanas.

A biomassa de *Bambusa vulgaris* Var. *Vittata*, *Dendrocalamus asper* e *Phyllostachys aurea*, além de galhos da poda e de palitos de erva-mate (*Ilex paraguariensis*), apresentaram parâmetros adequados para fins energéticos.