REDEMAT

REDE TEMÁTICA EM ENGENHARIA DE MATERIAIS

UFOP – CETEC – UEMG

Dissertação de Mestrado

"O bambu como material eco-eficiente: caracterização e estudos exploratórios de aplicações"

Autor: Patrícia Santos Delgado
Orientadora: Prof. Dra. Sebastiana Luiza de Bragança Lana
Co-orientadora: Prof. Dra. Eliane Ayres

Abril de 2011

REDEMAT

REDE TEMÁTICA EM ENGENHARIA DE MATERIAIS

UFOP – CETEC – UEMG

Patrícia Santos Delgado

"O bambu como material eco-eficiente: caracterização e estudos exploratórios de aplicações"

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais da REDEMAT, como parte integrante dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia de Materiais.

Área de concentração: Análise e Seleção de Materiais

Orientador: Prof. Dra. Sebastiana Luiza de Bragança Lana

Co-orientadora: Prof. Dra. Eliane Ayres

Ouro Preto, abril de 2011

A Leonardo, Mauro e Eliane.

Agradecimentos

À minha orientadora, Profª. Drª. Sebastiana Luiza de Bragança Lana.

À co-orientadora, Profª. Drª. Eliane Ayres.

Ao Prof. Dr. Rochel Montero Lago do Laboratório de Química Inorgânica do Departamento de Química da UFMG e sua equipe, em especial a Doutoranda Ana Paula Carvalho Teixeira.

Ao Prof. Dr. Rodrigo Oréfice, do Laboratório de Polímeros do Departamento de Engenharia de Materiais da UFMG.

À Profª. Drª. Patrícia Santiago de Oliveira Patricio, e à Profª. Drª. Nelcy Della Santiago Mohallem.

Às instituições CAPES, UEMG, UFOP, UFMG e REDEMAT, assim como seus colaboradores.

À BAMCRUS e seu diretor Lúcio Ventania pelo apoio e fornecimento de matéria prima.

Aos marceneiros Adão e Romualdo por ajudarem inúmeras vezes no processamento do bambu.

À minha melhor amiga, Marina, pelo imenso apoio e pelos cafés para distrair um pouco.

À Maria Adircila, pela grande parceria, assim como a todos colegas da REDEMAT, pelos momentos maravilhosos em Ouro Preto.

A todos aqueles que não foram citados aqui, mas que não são menos especiais, e sabem que exerceram um importante papel para a realização deste trabalho.

"É preciso muita fibra para chegar às alturas e, ao mesmo tempo, muita flexibilidade para se curvar ao chão."

Stephen R. Covey

D352b Delgado, Patrícia Santos.
O bambu como material eco-eficiente [manuscrito] : caracterização e estudos exploratórios de aplicações / Patrícia Santos Delgado. – 2011.
vii, 67f.: il. color.; grafs., tabs., mapas.

Orientadora: Profa. Dra. Sebastiana Luiza Bragança Lana
Co-orientadora: Profa. Dra. Eliane Ayres

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Ouro Preto. Rede Temática em Engenharia de Materiais.
Área de concentração: Análise e Seleção de Materiais.

1. Desenvolvimento sustentável - Teses. 2. Bambu - Teses. 3. Eco-design - Teses. I. Universidade Federal de Ouro Preto. II. Título.

CDU: 502.131.1:633.584.5

Catalogação: sisbin@sisbin.ufop.br

REDE TEMÁTICA EM ENGENHARIA DE MATERIAIS
UFOP - CETEC - UEMG
Pós-Graduação em Engenharia de Materiais

"O Bambu Como Material Eco-Eficiente: Caracterização e Estudos Exploratórios de Aplicações"

Autor(a): Patrícia Santos Delgado

Dissertação defendida e aprovada, em 26 de abril de 2011, pela banca examinadora constituída pelos professores:

Profª Sebastiana Luiza Bragança Lana (Doutora) – Orientador
Universidade do Estado de Minas Gerais / REDEMAT

Profª Patrícia Santiago de Oliveira Patrício (Doutora)
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais

Prof. Rochel Monteiro Lago (Doutor)
Universidade Federal de Minas Gerais

Profª Eliane Ayres (Doutora) – Co-Orientadora
Universidade do Estado de Minas Gerais

SUMÁRIO

RESUMO viii
ABSTRACT ix
LISTA DE FIGURAS x
LISTA DE TABELAS xi
LISTA DE NOTAÇÕES xii

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO 01
1.1. O bambu e seu potencial 02
1.2. Sustentabilidade e design 05

CAPÍTULO 2 - OBJETIVOS 06
2.1. Objetivo geral 07
2.2. Objetivos específicos 07

CAPÍTULO 3 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA 08
3.1. O bambu no Brasil e no mundo 09
3.2. O uso do bambu como material no design 11
3.3. O bambu como sequestrador de carbono 13

CAPÍTULO 4 – PARTE EXPERIMENTAL 17
4.1. Metodologia 18
4.2. Materiais e métodos para estudos relacionados à pirólise do bambu 19
4.3. Materiais e métodos relacionados à investigação a respeito do sequestro de carbono 20
4.4. Materiais e métodos para estudos relacionados à produção dos compósitos 21

CAPÍTULO 5 - RESULTADOS E DISCUSSÕES 22
5.1. Coleta e caracterização das amostras de bambu 23
5.2. Caracterização e estudos da pirólise do bambu 25
5.2.1. Análise termogravimétrica (TG) 25
5.2.2. Pirólise do bambu para produção de carbono 29
5.2.3. Análise do bambu através de microscópio óptico 30

5.2.4. Microscopia eletrônica de varredura (MEV) 30
5.3. O bambu como agente sequestrador de carbono 36
5.3.1. Determinação do teor de carbono na biomassa do bambu 36
5.3.2. Estimativa de absorção de CO_2 pelo aumento da biomassa do bambu 38
5.4. Compósito de fibra de bambu/polímero 42
5.4.1. Microscopia eletrônica de varredura (MEV) 44
5.4.2. Testes mecânicos 45
5.4.3. Experimentos de medida de ângulo de contato 46
5.5. Uso do bambu na construção civil em comparação ao aço 49
5.5.1. Substituição do aço pelo bambu – um estudo sobre a eco-eficiência 51

CAPÍTULO 6 - CONCLUSÕES 55

CAPÍTULO 7 – SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS 58

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 60

PUBLICAÇÕES DO AUTOR RELACIONADAS COM O TRABALHO 66

RESUMO

O objetivo principal deste trabalho foi apresentar o bambu e suas potencialidades, as possibilidades de uso como material de design, tanto em sua forma natural em substituição a outros materiais quanto como reforço a outros materiais. Foi também objetivo apresentar uma investigação a respeito do bambu como material eco-eficiente devido a sua grande capacidade de realizar o sequestro de carbono.

O trabalho foi dividido da seguinte maneira, primeiro foi feito um levantamento bibliográfico a respeito do bambu, onde são apresentadas as características do bambu e suas principais potencialidades já estudadas, as principais instituições no Brasil e no mundo que trabalham com a planta, seu uso como material de design e também algumas pesquisas relacionadas ao sequestro de carbono. Em seguida, na parte experimental, são apresentadas as pesquisas e análises que foram feitas para este trabalho. Essa foi dividida em quatro partes:

- Caracterização do material, onde foram feitos testes termogravimétricos, pirólise do material e microscopia eletrônica de varredura (MEV).
- Análise do bambu como agente sequestrador de carbono, através de análise elementar (CHN), comparação com outros agentes sequestradores baseada na literatura existente e discussão a respeito destes dados relacionando a taxa de crescimento da planta.
- Fabricação de um compósito usando o bambu na fase fibra com matriz de polietileno de baixa densidade com variação de quantidades de compatibilizante e plastificante, ensaios mecânicos no material, MEV e análise de ângulo de contato.
- Discussão a respeito do uso do bambu em substituição ao aço na construção civil.

Os resultados apontaram que o bambu abre uma vasta gama de possibilidades de usos pelos designers de produtos na substituição de outros materiais, também abre possibilidades para o uso pela engenharia de materiais e promove o sequestro de carbono.

ABSTRACT

The main objective of this study was to introduce the bamboo and its potential, the possibilities for use as design material, both in its natural form to substitute other materials and like reinforcement to other materials. It was also aimed at presenting an investigation into the bamboo as eco efficient material due to its great capacity to hold carbon sequestration.

The work was divided as follows, first a literature survey was done about the bamboo, where are presented the characteristics of bamboo and its main potential already studied, the main institutions in Brazil and the world working with the plant, its use as design material and also some research related to carbon sequestration. Then, in the experimental part presents the research and analysis that were made for this work. This was divided into four parts:

• Characterization of material, where tests were carried out thermogravimetric and pyrolysis of the material, scanning electron microscopy (SEM), Raman spectroscopy.
• Analysis of bamboo as a carbon sink, which carried out elemental analysis (CHN), compared with other sequestering agents based on existing literature and discussion of these data relating the growth rate of the plant.
• Manufacture of a composite using bamboo fiber with the matrix phase of low density polyethylene, with varying amounts of plasticizer and compatibilizer, mechanical tests on material, SEM analysis and contact angle.
• Discussion about the use of bamboo instead of steel in construction.

The results showed that bamboo opens a wide range of possible uses for the product designers in the substitution of other materials, it also opens possibilities for the use of engineering materials and promotes carbon sequestration.

LISTA DE FIGURAS

1.1. Distribuição do bambu no mundo. 02

1.2. Possibilidades de uso do bambu. 04

3.1. Banco produzido com bambu laminado colado. 12

3.2. Produtos feitos a partir do bambu. 12

5.1. Amostra de *Phyllostachys* usadas nas análises em ordem de idade. 23

5.2. Diferentes partes do colmo a serem analisadas. 24

5.3. TG da amostra $2S_{tot}$ sob atmosfera de ar. 26

5.4. TG da amostra $2S_{tot}$ sob atmosfera de N_2. 27

5.5. TG da amostra $4A_{tot}$ sob atmosfera de ar. 28

5.6. TG da amostra $4A_{tot}$ sob atmosfera de N_2. 28

5.7. Esquema ilustrativo do forno de bancada. 29

5.8. Fotografia do forno de bancada. 29

5.9. Amostra antes da pirólise. 30

5.10. Amostra de bambu com aumento de 4,10 e 40 vezes. 30

5.11. MEV da amostra do bambu inteiro. 31

5.12. MEV da amostra $4A_{tot}$ antes da pirólise. 32

5.13. MEV da amostra $4A_{tot}$ depois da pirólise. 33

5.14. MEV de amostras de bambu desfibrado em estado natural. 34

5.15. MEV de amostras de bambu desfibrado após a pirólise. 35

5.16. Percentual de carbono de acordo com a idade do bambu. 37

5.17. Percentual de carbono e hidrogênio das diferentes partes do colmo de amostras de 2 semanas e 4 anos. 38

5.18. Crescimento da biomassa nas plantas. 39

5.19. Estimativa de sequestro de CO_2 pelo bambu. 41

5.20. MEV- micrografia da superfície dos compósitos PEBD/Bambu com e sem aditivos. 44

5.21. Curvas tensão-deformação para os compósitos de PEBD/Bambu. 46

5.22. Medidas de ângulo de contato para os compósitos de PEBD/Bambu. 47

5.23. Gráfico demonstrativo da diferença entre o uso do bambu em substituição ao aço tratando de custos e emissão de CO_2. 54

LISTA DE TABELAS

V.1. Amostras de bambu coletadas para estudo e suas dimensões. 23
V.2. Nomenclatura das amostras. 24
V.3. Análise elementar por CHN das amostras de bambu com variações de idade e pontos da amostra. 36
V.4. Análise elementar CHN de amostra de *Eucalyptus* sp. 37
V.5. Comparativo de produtividade pinus x eucalipto x bambu. 39
V.6. Comparativo de produtividade do pinus, eucalipto e bambu durante 15 anos expressas em toneladas (t). 40
V.7. Amostras para os testes do compósito. 43
V.8. Comparação de materiais. Adaptado de Obermann. 50
V.9. Relação entre resistência a tração e peso específico. Adaptado de Ghavami. 51
V.10. Comparação entre o bambu e o aço de acordo com os parâmetros estabelecidos. 51
V.11. Emissões diretas de CO_2 por período ao longo de 25 anos de vida útil da plantação de bambu. Adaptado de Ghelmandi Neto. 52
V.12. Comparação da energia gasta em MJ para produzir 1m³ por unidade de tensão. 53

LISTA DE NOTAÇÕES

CHN	Carbono, Hidrogênio e Nitrogênio
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
ONG	Organização não governamental
PEBD	Polietileno de baixa densidade
PE-g-AM	Polietileno graftizado com anidrido maleico
RPM	Rotação por minuto
TG	Termogravimetria

Capítulo 1

Introdução

Inicia-se este trabalho com uma breve apresentação do bambu, suas potencialidades e a importância deste estudo. Também será mostrada a relação entre sustentabilidade e design e o importante papel do bambu neste âmbito.

1.1. O Bambu e seu potencial

Pertencente à família das gramíneas, o bambu tem acompanhado o desenvolvimento humano desde o princípio do desenvolvimento tecnológico, fornecendo abrigo, alimento, utensílios domésticos e outros artefatos. No oriente, é conhecido como a planta dos mil usos, devido às suas excelentes característica físicas, químicas e mecânicas. Pode ser considerado como um material altamente ecológico. Leva pouco tempo para ser renovado, produzindo colmos assexuadamente durante anos sem necessidade de replantio[1].

O emprego do bambu apresenta, em comparação com a madeira, uma série de vantagens. Destacam-se entre seus diversos benefícios o baixo custo, leveza, possibilidade de curvatura, superfície lisa, coloração atrativa, resistência à tração comparável à do aço, resistência à compressão superior a do concreto, grande rigor estético e excelentes resultados na fabricação de móveis, estruturas, tubulações, drenos e habitações[2].

Os bambuzais podem ser encontrados em latitudes entre 45°30’ norte e 47° sul. Sua principal área de distribuição é nos trópicos, em regiões quentes e chuvosas como na Ásia tropical, África e América do Sul, possuindo poucas espécies nas áreas temperadas (Figura 1.1). A maioria das espécies se desenvolve em temperaturas que podem variar de 8°C a 36°C[3].

Figura 1.1. Distribuição do bambu no mundo[3].

Apesar de fazer parte de uma cultura milenar, e servir como fonte de renda para mais de um bilhão de pessoas na Ásia, o bambu ainda é pouco conhecido e divulgado nos países da América Latina. Mesmo esta possuindo grandes áreas florestais de bambu, apenas alguns países como Venezuela, Colômbia, Peru e Costa Rica promovem a pesquisa e exploração do

bambu. Ainda assim, os estudos e aplicações na produção industrial ainda são bastante restritos[3].

Segundo Londono[4], o Brasil conta com a maior diversidade e o mais alto índice de florestas endêmicas de bambu em toda a América Latina: existe mais de 130 espécies e 17 gêneros, o que representa 32% das espécies e 85% dos gêneros presentes na América Latina sendo que os Estados de São Paulo, Minas Gerais, Santa Catarina, Bahia e Paraná, possuem a maior diversidade de florestas de bambu.

A maior plantação comercial de bambu situada no Brasil é propriedade do Grupo Industrial João Santos. Esta plantação possui mais de 108km^2 e é cultivada nos estados do Maranhão, Paraíba e Pernambuco[5].

O bambu tolera além de solos ácidos com baixa fertilidade, longos períodos de seca, sobrevive em associação com a floresta e pode ser usado na recuperação de áreas degradadas. Um programa para plantio de bambu em pequenas e médias propriedades e em áreas de assentamento é uma saída para a agricultura no país.

Do ponto de vista ecológico, o bambu consome menos energia. Pesquisas da ABMTENC - Associação Brasileira em Materiais e Tecnologias não Convencionais[6] sobre o consumo energético e o impacto ambiental dos diferentes materiais e materiais alternativos, apresentaram resultados positivos dos testes que desenvolve com o bambu como substituto ao aço em estruturas de lajes, vigas e colunas de concreto.

Segundo Casagrande[7], foi feita uma avaliação sócio-econômica em torno do potencial de uso do bambu encontrado na Colônia Parque Verde (uma área de 416,26ha., dentro do município de Fazenda Rio Grande, Região Metropolitana de Curitiba) constituída originalmente de 27 pequenas propriedades com extensão variando de 1 alqueire a 9 alqueires pertencentes a famílias de origem japonesa, que tem como atividade a produção hortifrutigranjeira. As diversas possibilidades do uso do bambu na região dentro de uma cadeia produtiva podem ser observadas na Figura 1.2.

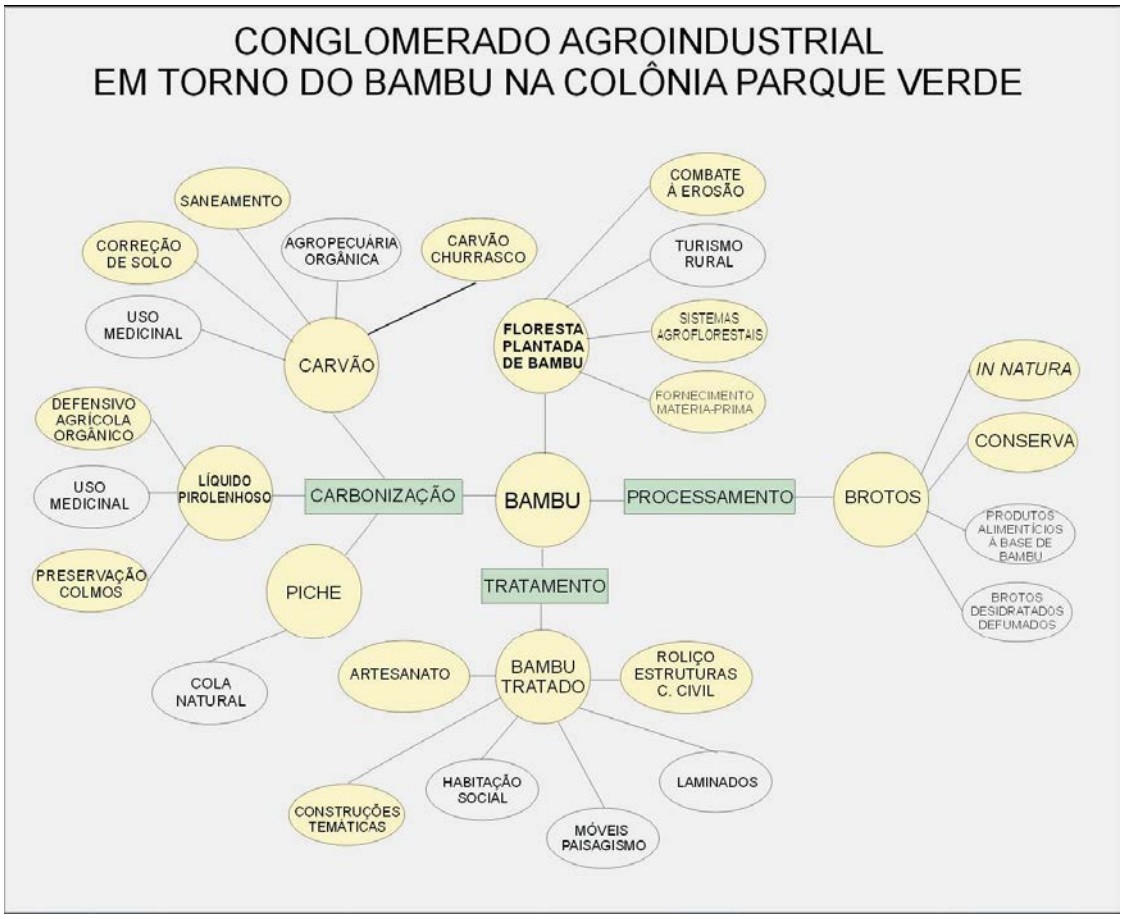


Figura 1.2. Possibilidades de uso do bambu[7].

Os bambuzais também trazem benefícios para a comunidade, pois além de proporcionar a infiltração das chuvas no solo, auxiliam no controle da erosão, do assoreamento e na recuperação de gás carbônico da atmosfera. Entre as mais diversas aplicações, o bambu pode ser utilizado na co-geração de energia elétrica pelas usinas de açúcar, na produção de celulose e papel, na manufatura de móveis e artesanatos, na construção civil urbana e rural e como alimento, através do broto de bambu[2].

Diante do exposto, fica clara a importância de se estudar a fundo as propriedades e potencialidades do bambu, pois sendo um material sustentável e de fácil manejo, pode ser uma boa alternativa para os problemas sociais e ambientais.

1.2. Sustentabilidade e design

Uma sociedade sustentável, não se baseia apenas em usar menos recursos naturais e preservar o meio ambiente. Sustentabilidade é um conceito sistêmico e deve abranger todos os campos do desenvolvimento humano[8].

Bonsiepe[9] define design como "atividade que se ocupa da definição das características funcionais, estruturais e estético-formais de produtos industriais e sistemas de produtos, considerando os fatores técnico-econômicos, técnico-produtivos e sócio-culturais". Portanto, fatores econômicos, tecnológicos, culturais, psicológicos e ecológicos estão intrinsecamente ligados ao design, assim como problemas energéticos, problemas de poluição de limitação de recursos naturais não renováveis.

Assim, justificam-se pesquisas e estudos acerca da utilização de materiais alternativos aos tradicionalmente usados em larga escala, esses materiais sendo de natureza renovável; o bambu, especificamente, sendo o objeto de pesquisa desse trabalho, será apresentado como alternativa extremamente viável para o desenvolvimento de produtos de design.

Além disso, o bambu tem contribuído com iniciativas no campo da geração de renda e do empreendedorismo social no desenvolvimento local por conta de seu crescimento rápido em todas as regiões do Brasil aliado a uma multiplicidade de usos que vão desde o artesanato caseiro até a utilização na construção civil.

Capítulo 2

Objetivos

2.1. Objetivo geral

Este trabalho pretendeu desenvolver uma análise das potencialidades do bambu, por se tratar de um material extremamente viável para o desenvolvimento de novos produtos, através de estudos exploratórios de aplicações. Além disso, pretendeu-se analisar sua eco-eficiência por possibilitar o sequestro de carbono.

2.2. Objetivos específicos

- Realizar testes de caracterização de amostras de bambu em laboratório, para o melhor conhecimento de suas propriedades térmicas, químicas e físicas.

- Pesquisar a respeito do sequestro de carbono, discutindo as técnicas já aplicadas para mensuração do carbono armazenado e fazer uma análise relacionada à sua taxa de crescimento.

- Desenvolver um compósito com matriz polimérica, usando o bambu como carga de reforço e analisar as propriedades do novo material formado através de testes mecânicos.

- Estudar as principais características do bambu, ocorrências e possibilidades no desenvolvimento de novos materiais, ou substituições em materiais já existentes.

- Discutir a respeito do bambu em substituição ao aço na construção civil.

Capítulo 3

Revisão bibliográfica

Será apresentada uma breve revisão bibliográfica dividida em três partes. A primeira consta de uma apresentação das principais instituições no Brasil e no mundo que trabalham com o bambu e seus objetivos. Em seguida será apresentado o bambu como material de design, sendo usado em substituição a outros materiais e também como material de reforço. Por fim, serão apresentados estudos em relação ao sequestro de carbono e algumas investigações já feitas a respeito do tema.

3.1. O Bambu no Brasil e no Mundo

Existem várias iniciativas e projetos a respeito do bambu em todo o mundo. Eventos e cursos sobre os diversos tipos de aplicação do bambu ocorrem regularmente e no mundo inteiro e várias sociedades internacionais se dedicam ao estudo, conhecimento e divulgação do bambu.

Segundo dados do Grupo Bambu Brasil[10], um grupo de discussão da internet que tem o interesse em incentivar e manter o uso do bambu, existem grupos no mundo inteiro trabalhando em pesquisas de incentivo ao bambu. Como exemplo, pode-se citar a criação da IBA (*International Bamboo Association*) que tem como propósito unificar as associações de todo o mundo. A ABS (*American Bamboo Society*) já vem desenvolvendo seu trabalho há algum tempo e possui um projeto, o BIM (*Bamboo Identification Manual*), ferramenta on-line para ajudar na identificação das espécies. A EBS (*European Bamboo Society*) é similar ao grupo americano, com seus diversos capítulos divididos entre os países. Na Austrália, a *Bamboo Society of Australia* congrega muitos dos entusiastas australianos. Atualmente o grupo de discussão *Bamboo Plantations* aborda questões de ponta com a participação de especialistas.

A Ásia conta com a Sociedade Indiana de Bambu, a Sociedade Chinesa de Bambu, a Sociedade Japonesa de Bambu e a Sociedade Filipina de Bambu. Na China existe o China *Bamboo Research Center*, um centro nacional que desenvolve pesquisas sobre as 1.250 espécies existentes. A china se destaca pela exploração, fabricação e comercialização de produtos que têm o bambu como matéria prima. É na Ásia o principal foco de atuação da INBAR (*International Network for Bamboo and Rattan)*, instituição de pesquisa e gerenciamento no desenvolvimento de programas sociais que utilizam o bambu e o ratan. Já existem muitos países membros na Ásia e nas Américas.

Na América do Sul existe a ECUABAMBU no Equador, e na Colômbia, a *Sociedad Colombiana de Bambú*. Na América Central, a Costa Rica conta com a FUNBAMBU, fundação criada para gerenciar o Projeto Nacional do país. Há também a AMEB (Associação Mexicana de Bambu) e a ASOBAMBU, da Guatemala.

No Brasil a ABMTENC pesquisa o uso de materiais de construção alternativos, sendo o bambu um material de destaque. Na PUC-RJ, o Dr. Khosrow Ghavami, da Faculdade de Engenharia Civil, pesquisa o bambu desde a década de 70, e é presidente da ABMTENC. O Prof. Luis Mendes Ripper, do Departamento de Artes & Design, coordena o LOTDP - Laboratório Oficina de Desenvolvimento de Protótipos, onde o bambu é um material utilizado em estruturas e objetos. O Prof. Tarciso Filgueiras em Brasília, trabalha com espécies nativas de gramíneas, inclusive o bambu. Edson Sartori e Rubens Cardoso, de Campo Grande - MS realizam seminários e construções com bambu. No IAC (Instituto Agronômico de Campinas), o Prof. Anizio Azzini e o Prof. Antônio de Barros Salgado pesquisam as aplicações do bambu. Existem também diversos engenheiros florestais que começam a desenvolver trabalhos de contenção de encostas.

Além disso, existem muitas comunidades que vivem do bambu. Como exemplo pode-se citar a Bambuzeria Cruzeiro do Sul (BAMCRUS)[11], uma organização não governamental de Belo Horizonte, que há mais de 15 anos vem utilizando o bambu como matéria prima para geração de trabalho e renda. A ONG apresenta um programa social *"Desenvolvimento do Ciclo do Bambu no Brasil"*, que propicia atividades ocupacionais através de cursos técnicos para o cultivo e manejo do bambu com programas de incentivo e suporte para formação de associações e cooperativas sociais de produção e comercialização de eco produtos em bambu (bambuzerias).

Em 2008, o CNPq, Centro Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico[12], lançou em um edital a chamada para a Redebambu, que está apoiando projetos de difusão de conhecimento ambiental e de tecnologias de utilização na construção civil, na indústria de móveis e em artefatos. Foram disponibilizados recursos no valor global estimado de até R$ 1,8 milhão.

3.2. O Uso do Bambu como material no Design

O bambu pode ser uma alternativa viável de material sustentável para aplicação ao design industrial. Um exemplo a ser citado é o trabalho de Biswas *et al.*[13] no qual um estudo comparativo entre fibra de vidro e bambu em compósitos de resina epóxi mostrou que o compósito com bambu apresentou propriedades mecânicas inferiores. Entretanto, o desgaste por erosão foi menor.

O desempenho das fibras de bambu também foi avaliado em compósitos com matriz de resina poliéster[14]. Neste caso, ficou demonstrado o excelente desempenho do bambu tanto nos testes de tração como nos testes flexão.

Outro exemplo é o de um estudo feito por Liu *et al.*[15] que fez a extração de nanocristais de fibras de bambu, investigou a morfologia e a estrutura destes cristais e os combinaram com uma matriz de amido hidrofílico para formar um composto. Os resultados demonstraram que os cristais de fibra de bambu apresentaram uma maior eficiência para reforço de amido plastificado do que qualquer outro nível de carga. A resistência a tração e o módulo de Young do compósito foram muito superiores ao seu homólogo glicerol plastificado, sem cristais de amido de bambu.

O bambu, além de suas propriedades físicas e mecânicas, é um ótimo exemplo de material alternativo, pois possui diversas aplicações possíveis e ainda pouco exploradas no design de produtos. É também um material considerado sustentável, o que significa que pode ser produzido de maneira ecológica e com responsabilidade sócio-econômica, estando inserido no conceito de eco-design[16].

Pesquisadores da UNESP – Bauru/SP fizeram testes com um protótipo de bambu laminado colado (Figura 3.1) e puderam constatar a eficiência e as possibilidades de conformação, como curvaturas e fabricação de compensado do bambu, com alta resistência mecânica e excelente qualidade estética[3].

Figura 3.1. Banco produzido com bambu laminado colado[3]

Algumas iniciativas já vêm sendo tomadas e muitos designers têm procurado incluir o bambu em projetos inovadores, explorando as potencialidades da planta, como por exemplo, a fruteira do designer Paulo Bustamante (Figura 3.2), ou os utensílios domésticos da Yanko Design[17].

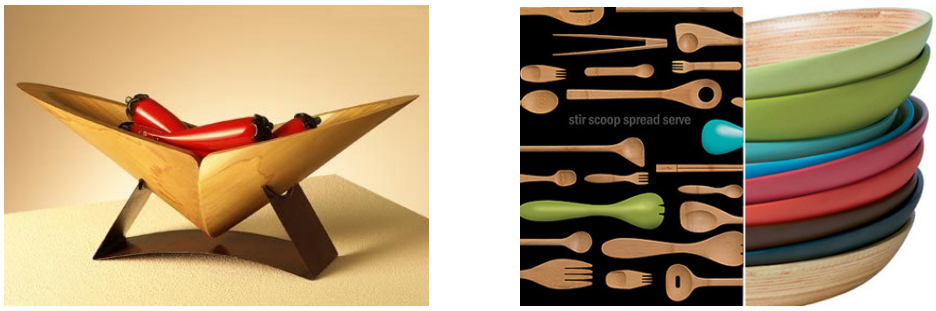


Figura 3.2. Produtos feitos a partir do bambu[17].

O bambu abre uma série de possibilidades para substituição de materiais, porém a maioria dos produtos feitos com o bambu é produzida de forma artesanal e com pouco valor agregado.

3.3. O bambu como sequestrador de carbono

Algumas medidas para a redução dos níveis atuais de CO_2 na atmosfera foram propostas no Tratado de Kyoto em 1997, que estabeleceu como meta para os países desenvolvidos uma redução em 5% da emissão de gases que causam o efeito estufa até 2012[18]. Na recente conferência do clima da ONU em Copenhague, o governo brasileiro anunciou uma meta voluntária de redução dos gases de efeito estufa entre 36,1% a 38,9% até 2020.

Para reduzir a concentração de dióxido de carbono atmosférico existem duas possibilidades: a redução das emissões ou a absorção do dióxido de carbono produzido em excesso, também denominado de sequestro de carbono.

O mecanismo de sequestro de carbono ("Mecanismo de Desenvolvimento Limpo"), que está sendo proposto é o plantio de árvores que possuem a capacidade de incorporar o dióxido de carbono à biomassa vegetal através do processo da fotossíntese.

Neste contexto, a pesquisa das potencialidades do bambu, uma planta classificada como C4, isto é, de alta absorção de carbono (a denominação C4 refere-se ao número de átomos de carbono presentes no primeiro produto de fixação do CO_2) é altamente relevante.

Diante disso, concomitantemente à exploração bambu como material para o design sustentável de produtos, é perceptível a demanda de pesquisas com relação à mensuração do carbono. Cientistas de todo mundo tem pesquisado formas de reter o carbono na superfície terrestre. Muitas pesquisas têm sido desenvolvidas em plantas, florestas e algas, para se descobrir a maneira mais eficiente de se fazer isso.

Segundo Priscila Coltri[19], que vem testando a possibilidade de usar índices de vegetação para estimar a biomassa e o potencial para sequestro e estoque de carbono de plantações de café, o sequestro é uma medida de quanto carbono a planta tira do ambiente e incorpora em sua biomassa. Já o fluxo de carbono mede quanto do carbono no ambiente a planta emprega no processo de fotossíntese. Por sua vez o estoque representa a biomassa que a planta incorpora permanentemente no tronco, nos ramos, nas folhas e só pode se perder quando há derrubada ou queima. "Estima-se que 50% da biomassa de uma planta sejam

compostos por carbono, mas isso pode mudar de acordo com a espécie", afirma a pesquisadora.

Giselda Durigan[20], explica que a taxa de absorção depende de três fatores: da temperatura, que varia de acordo com a disponibilidade de água e nutrientes do meio, do tipo de vegetação, pois florestas homogêneas ou geneticamente modificadas podem fixar carbono até 10 vezes mais rapidamente do que florestas naturais, e também, da concentração de carbono na atmosfera, quanto maior a concentração, mais rápida é a fixação.

A maioria dos cálculos feitos a partir da biomassa são através de uma metodologia reconhecida internacionalmente, aprovada em 2005 pela UNFCCC[21] (United Nations Framework Convention on Climate Change) que monitora o estoque de carbono em florestas plantadas. A mesma metodologia usada para o cálculo da biomassa em árvores pode ser usada para calcular a biomassa do bambu.

O cálculo do carbono através da biomassa é baseado no tamanho das plantas em uma determinada área. É um cálculo pouco cientifico e influenciado por diversos fatores, como a temperatura local, a taxa de luminosidade, a idade da planta, a influência de outras plantas na área estudada. Consiste em separar uma determinada área de uma floresta ou plantação, e tirar todas as medidas de tamanho e peso de tudo contido naquela área, como no caso do bambu, os colmos, folhas, galhos e, inclusive, raízes. A partir daí é aplicada uma equação matemática que determina a quantidade de carbono naquela área. Neste cálculo são consideradas as alterações da densidade aparente e espessura da camada estudada [22].

Este método apresenta muitas variáveis que o influenciam sendo, portanto, um método impreciso e pouco confiável. Por exemplo, poucos pesquisadores separam as amostras por idade. São medidas todas as espécies naquela área determinada, e muitas vezes existem outras espécies de plantas que, de acordo com o método, devem ser medidas também. Alguns pesquisadores fizeram mensurações em uma mesma plantação em áreas próximas, e os resultados foram bem diferentes. Isso porque a iluminação direta varia de uma área para outra, seja pela presença de outras plantas mais altas ou pela geografia do local. Outro fator relevante é que as equações utilizadas são feitas a partir de padrões internacionais, ou seja, não são desenvolvidas para condições de clima e solo específicos o que pode sub ou superestimar a biomassa encontrada. Além disso, as práticas de manejo podem alterar a

densidade do solo e, assim, ao se considerar uma mesma profundidade de uma área cultivada e de uma área sob vegetação nativa, as massas de solo serão diferentes, podendo levar a interpretações equivocadas [21,22].

Apesar de o bambu ser considerado um sequestrador de carbono devido ao seu rápido crescimento, pouca informação tem sido disponível para sustentar essa idéia. Segundo o diretor do INBAR, Lou Yiping, por enquanto o método da biomassa ainda é possivelmente o melhor método. A razão é que erros através de outros métodos como o cálculo através da fotossíntese são mais altos do que os apresentados pelo método da biomassa em uma estimativa em grande escala. Além disso, métodos através da fotossíntese são demorados e caros. Por outro lado, quase não existem projetos no mundo especificamente designados para medir o carbono através de outros métodos.

Pesquisadores da Universidade Paulista, fizeram uma contabilidade do fluxo de CO_2 em uma plantação comercial de bambu, em três estágios: implantação, adaptação e operação, visando uma avaliação mais completa das quantidades de CO_2 liberadas e estocadas ao longo dos 25 anos de vida útil. O objetivo era mensurar a real taxa de absorção de carbono em uma plantação, tendo em vista que é necessário avaliar o real potencial de uma plantação de bambu, sendo que é emitida uma grande quantidade de CO_2 através dos insumos utilizados na implantação e manutenção da plantação, como por exemplo, o óleo diesel utilizado. Os resultados constataram que o bambu é uma planta com alto potencial de estoque de carbono (entre 31.860 e 77.039 $kgCO_2$/ha ano)[23].

Borges *et al.*[24], mediram a taxa de absorção do CO_2 de algumas espécies de microalgas normalmente utilizadas na agricultura. Foi medida a taxa de fotossíntese das algas, e conseguiram quantificar o fluxo de carbono através dos parâmetros fotossintéticos das curvas PxI (taxa de fotossíntese X irradiância de saturação) e também conseguiram prever a época do ano mais propícia para o florescimento de determinadas espécies, considerando-se condições favoráveis de nutrientes e temperatura. As espécies com maiores taxas de crescimento e produção de biomassa apresentavam melhor eficiência fotossintética e baixa liberação de carbono dissolvido no ponto máximo de saturação de luz, onde ocorre a produção fotossintética máxima. Eles compararam diferentes espécies de microalgas e determinaram quais teriam os maiores valores de absorção.

Oliveira *et al* [25] calcularam o carbono na biomassa e na respiração do solo em plantio comercial de seringueiras no Paraná. Eles moeram as amostras em laboratório e o conteúdo de carbono foi determinado para cada sub-amostra no Laboratório de Análises de Solo do IAPAR, utilizando o método de Walkley-Black conforme descrito por PAGE *et al.*

> *O carbono é acumulado nas plantas a partir da fotossíntese. As taxas fotossintéticas podem ser estimadas pela quantificação dos fluxos de dióxido de carbono (CO_2) no ar e no solo. Um dos métodos utilizados para estimativa de fluxo de gases provenientes do solo é o micrometeorológico, com medida do gradiente 7 da concentração de CO_2 acima do nível do solo (Wagner-Riddle et al., 1996). Outra possibilidade é o uso de câmaras fechadas em que se mede diretamente a concentração de CO_2 usando analisadores de gás infra-vermelho (IRGA). Essas câmaras têm sido propostas em diferentes formas e tamanhos ao longo das últimas décadas (Rosenberg et al., 1983; Norman et al., 1992).*

Pesquisadores da Alemanha desenvolveram um micro sensor com uma ponta de 2 micrômetros de diâmetro para medir o fluxo de carbono através dos poros estomatais de folhas de plantas[26]. A montagem deste sensor consistia de um micro eletrodo de pH baseado no transporte de H^+, concentricamente arranjado dentro a uma micropipeta. A ponta desta micropipeta foi cheia com um tampão de carbonato, do qual o pH responde rapidamente às mudanças de CO_2. Os resultados apontaram que este micro sensor é uma eficiente ferramenta para se monitorar o fluxo de CO2 em lugares pequenos para serem acessados por ferramentas convencionais.

Capítulo 4

Parte experimental

Serão apresentados os materiais e métodos usados durante a parte experimental deste trabalho, já citadas anteriormente.

4.1. Metodologia

A parte experimental foi dividida em quatro etapas:

- Estudos relacionados à pirólise do bambu

Nestes estudos foram feitas: análise termogravimétrica (TG), pirólise de bambu em forno de bancada e microscopia eletrônica de varredura (MEV).

- Investigação a respeito do sequestro de carbono

Para essa etapa foi feita uma análise elementar (CHN) com o bambu em idades diferentes e em partes diferentes do colmo. Em seguida, os resultados foram comparados com duas espécies de plantas de rápido crescimento: eucalipto e o pinus, baseada em dados da literatura consultada.

- Fabricação de compósito

Foram testadas as potencialidades do bambu para a confecção de um compósito com matriz de polietileno de baixa densidade (PEBD), utilizando variáveis como a adição de diferentes quantidades de compatibilizante e plastificante. Em seguida foram feitos testes mecânicos, microscopia eletrônica de varredura (MEV) e testes de ângulo de contato.

- Uso do bambu na construção civil

Análise a partir de dados bibliográficos para se fazer uma comparação do uso do bambu em substituição ao aço na construção civil.

4.2. Materiais e métodos para estudos relacionados à pirólise do bambu

As amostras de bambu foram colhidas na Bambuzeria Cruzeiro do Sul – BAMCRUS[11], situada em Ravena no distrito de Sabará/MG, onde possui um bambuzal com várias espécies, um centro de tratamento, cursos técnicos sobre o cultivo e manejo do bambu e uma biblioteca especializada.

Foram escolhidas amostras do gênero *Phyllostachys*, que é um dos mais variados, tendo grande número de espécies. Para este experimento foram usados bambus da espécie *Phyllostachys heterocycla*, conhecidos também como bambu mossô.

Para essa etapa, as análises foram feitas no laboratório de química inorgânica da Universidade Federal de Minas Gerais – UFMG, conforme descrito a seguir:

- Análise Termogravimétrica (TG)

As análises de termogravimentria (TG) foram feitas para determinação da umidade, teor de cinzas e estabilidade térmica. Foram analisadas as amostras de duas semanas e de quatro anos. A degradação térmica das amostras foi conduzida em um módulo termogravimétrico de aparelho DTG – 60H – Shimadzu, com aquecimento a partir de 25°C em atmosfera dinâmica de N_2 e de ar com fluxo de 110mLmin^{-1}e razão de aquecimento de 10°Cmin^{-1}. A temperatura máxima empregada foi de 900°C, em suporte de amostra de alumina usando 7 ± 1mg de amostra.

- Pirólise em forno de bancada

Foi feita uma pirólise com amostra de quatro anos em forno de bancada Lindberg/BlueM com gás nitrogênio e aquecimento até 700°C, para se fazer uma análise comparativa com as amostras em estado natural, com fibras trituradas e inteiras.

- Microscopia Eletronica de Varredura (MEV)

Com as amostras inteiras, trituradas e com o produto final da pirólise, foi feita uma microscopia eletrônica de varredura (MEV) em equipamento Quanta 200 – FEG – FEI 2006, para avaliação da estrutura do material restante e verificação da possibilidade de se obter fibras de carbono a partir do bambu. Foram comparadas as imagens do material antes e depois da pirólise.

4.3. Materiais e métodos relacionados à investigação a respeito do sequestro de carbono

Para esta parte do trabalho foram usadas as amostras da mesma espécie, porém nas idades entre 2 semanas e 4 anos. As amostras foram fotografadas e medidas como pode ser visto na Figura 5.1 e Tabela V.1 do Capítulo 5.

Foi feita uma análise elementar (CHN) em Analisador CHN Perkin-Elmer 2400 para determinação dos teores de carbono, hidrogênio, nitrogênio. Esta análise também foi feita no Departamento de Química da UFMG.

Realizaram-se análises de CHN em amostras de todas as idades (entre duas semanas e 4 anos) incluindo todas as partes dos colmos. Analisou-se ainda a amostra mais nova e a mais velha separando as partes, sendo analisadas separadamente as partes externas, internas e do meio.

4.4. Materiais e métodos relacionados à produção dos compósitos

Foram utilizadas amostras de bambu também do gênero *Phyllostachys*, com 3 anos, as quais foram preparadas no Laboratório de Química da UFMG. As amostras foram trituradas em lixadeira de fita e em seguida os grãos foram selecionados através da peneira ASTM-100 mesh.

A parte matriz foi feita com Polietileno de baixa densidade (PEBD) (BRASKEN), com variação de dois agentes: Polietileno graftizado com anidrido maleico (PE-g-AM) (CROMPTON/SP), e glicerol (SYNTH).

O processamento dos compósitos e os testes mecânicos foram feitos no Laboratório de Polímeros do Departamento de Engenharia de Materiais da UFMG. As amostras foram misturadas em termohaaker (Polydrive mixer) a 110°C com rotação de 40 RPM, durante 10 minutos. Depois de misturados, foram preparados os filmes em uma prensa a 110°C por 5 minutos, com 2 toneladas de pressão.

Para os testes mecânicos foi usada uma máquina de ensaios universal (EMIC DL 3000) utilizando uma célula de carga de 200 N. Os corpos de prova foram confeccionados de acordo com a norma ASTM D-638. Para cada amostra foi reportado um valor com desvio padrão menor que 5%, a partir de 5 medidas obtidas com uma velocidade de 25 mm min^{-1}.

A morfologia dos materiais obtidos foi investigada por microscopia eletrônica de varredura. Os experimentos foram realizados em um equipamento JEOL, modelo 840 A e foi feita a fratura criogênica das amostras.

A molhabilidade da superfície dos compósitos foi pesquisada através da medida do ângulo de contato formado entre a água e filmes preparados a partir dos compósitos empregando goniômetro DIGIDROP-DI (GBX Instruments). Os resultados representam as médias entre os ângulos direito e esquerdo, obtidos após deposição de gotas de água com volume padronizado (10µL), sobre filmes com dimensões de 2cm x 2cm. Foram feitas três medições consecutivas, à temperatura ambiente, empregando o modo Surface Energy do software, que permite a medida, em graus, direta do ângulo de contato.

Capítulo 5

Resultados e Discussões

Neste capítulo serão apresentados os resultados dos testes de caracterização e as discussões a respeito do bambu, suas características e potencialidades na substituição de outros materiais. O capítulo foi dividido em quatro partes, iniciando com estudos relacionados à pirólise do bambu, em que foram feitos testes de TG, pirólise em forno de bancada e MEV. Em seguida serão apresentados os resultados dos estudos relacionados à capacidade de sequestro de carbono pelo bambu, onde foi feita uma análise elementar CHN e uma discussão comparativa entre o bambu, o eucalipto e o pinus. Também, relacionada às potencialidades do bambu, foi desenvolvido um compósito, Bambu-PEBD com variações de compatibilizante e plastificante, e realizaram-se testes mecânicos, MEV e análise de ângulo de contato. Por fim, foi feita uma discussão a respeito do uso do bambu em substituição ao aço de construção, baseada na literatura existente.

5.1. Coleta e caracterização das amostras de bambu

As amostras foram cortadas e delas foram retiradas as folhas e pequenos galhos. Foram colhidas 6 amostras de bambu em idades diferentes variando entre 2 semanas e 4 anos de idade. As idades foram informadas pelo diretor da BAMCRUS[11], Lúcio Ventania. As amostras (Figura 5.1) foram medidas conforme a Tabela V.1. As amostras pertencem à mesma espécie (*Phyllostachys heterocycla*) porém foram plantadas em épocas diferentes e colhidas de acordo com a idade em um mesmo momento.

Figura 5.1. Amostras de *Phyllostachys* usadas nas análises em ordem de idade.

Tabela V.1. Amostras de bambu coletadas para estudo e suas dimensões.

Idade da amostra	Tamanho do colmo (mm)	Diâmetro (mm)	Parede (mm)
2 semanas	70	8	2
1 ano	90	8	2
2 anos	80	10	2
2,5 anos	105	20	3
3 anos	110	43	6
4 anos	110	46	6

Para facilitar a identificação, as amostras foram codificadas (Tabela V.2). Em algumas análises utilizaram-se diferentes partes do colmo, separadas em partes interna, meio, externa e parte total, como mostrado na Figura 5.2.

As amostras de bambu foram cortadas no topo do colmo e trituradas com o auxilio de uma lima metálica a fim de evitar a contaminação.

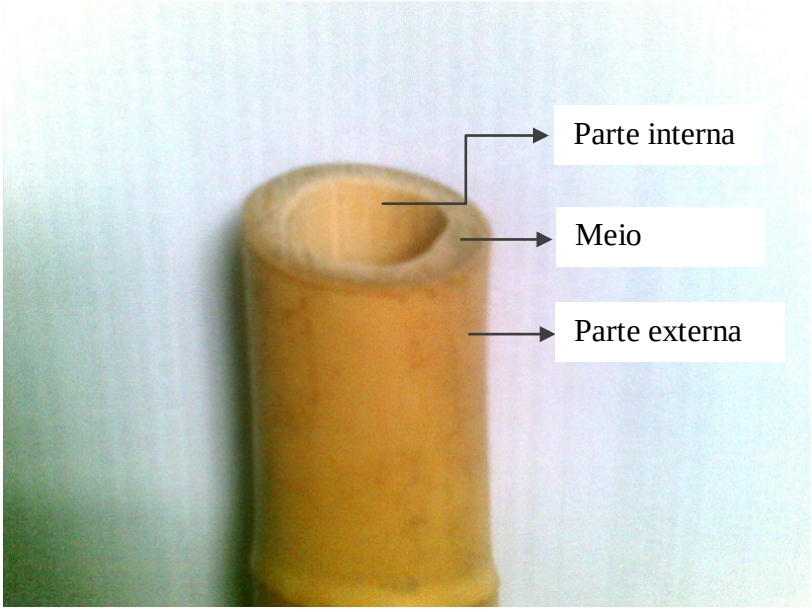


Figura 5.2. Diferentes partes do colmo a serem analisadas.

Desta forma, considerando as 6 idades diferentes de bambu, foram obtidas 24 sub-amostras, sendo 4 amostras (uma incluindo todas as partes, uma da parte interna, uma do meio e outra da parte externa) de cada idade. As amostras foram nomeadas conforme a Tabela V.2:

Tabela V.2. Nomenclatura das amostras.

Idade da amostra	**Todas as partes**	**Parte interna**	**Meio**	**Parte externa**
2 semanas	$2S_{tot}$	$2S_{int}$	$2S_{meio}$	$2S_{ext}$
1 ano	$1A_{tot}$	$1A_{int}$	$1A_{meio}$	$1A_{ext}$
2 anos	$2A_{tot}$	$2A_{int}$	$2A_{meio}$	$2A_{ext}$
2,5 anos	$2{,}5A_{tot}$	$2{,}5A_{int}$	$2{,}5A_{meio}$	$2{,}5A_{ext}$
3 anos	$3A_{tot}$	$3A_{int}$	$3A_{meio}$	$3A_{ext}$
4 anos	$4A_{tot}$	$4A_{int}$	$4A_{meio}$	$4A_{ext}$

5.2. Caracterização e estudos da pirólise do bambu

O estudo da pirólise do bambu foi feito com o objetivo de se verificar a possibilidade da fabricação de fibras de carbono a partir da fibra de bambu. As fibras de carbono são matérias primas que provém da pirólise de materiais carbonáceos que produzem filamentos de alta resistência mecânica usados para os mais diversos fins, como por exemplo, motores de naves espaciais[27]. Para isso, verificou-se através da análise termogravimétrica a temperatura de decomposição do bambu e o teor de carbono formado, o teor de umidade presente na amostra e a quantidade de cinzas restantes após a perda total da massa. Foi feita também a pirólise em forno de bancada, cujo procedimento será mostrado a seguir. Por fim foram obtidas micrografias microscópio eletrônico de varredura (MEV).

5.2.1. Análise termogravimétrica (TG)

As amostras de bambu foram analisadas por termogravimetria para a determinação de parâmetros importantes:

- A estabilidade térmica;
- temperatura de pirólise para a formação de carbono;
- rendimento de carbono;
- teor de cinzas.

Foram utilizadas amostras das idades extremas, 2 semanas e 4 anos. A Figura 5.3 a seguir, mostra o resultado da TG da amostra $2S_{tot}$ em atmosfera de ar.

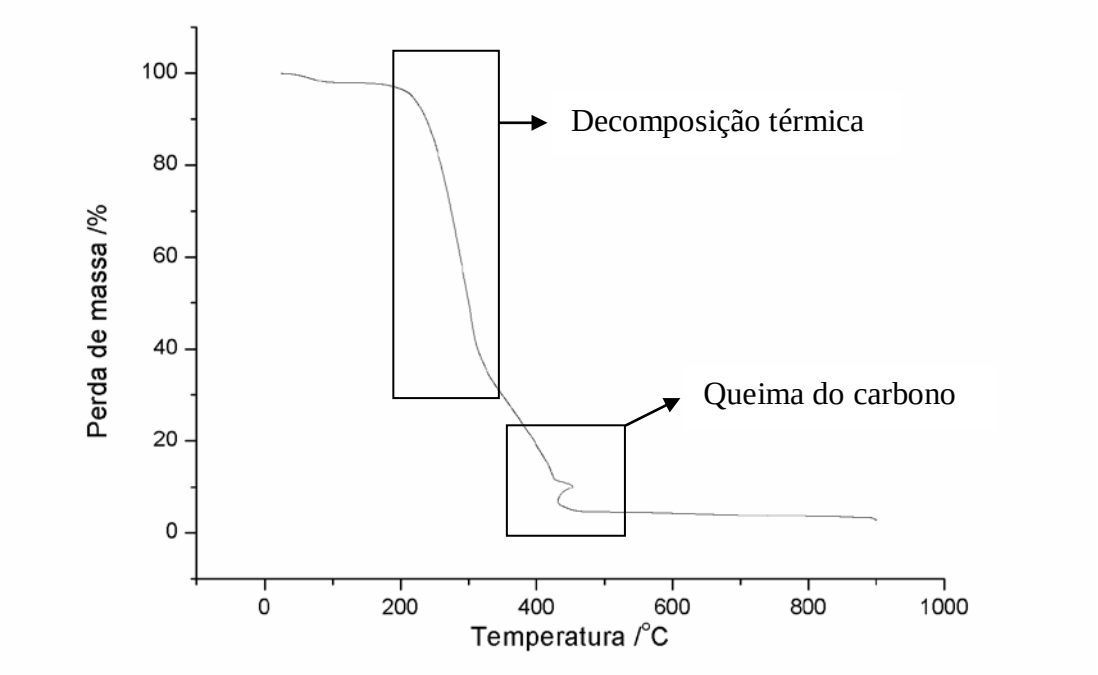


Figura 5.3. TG da amostra $2S_{tot}$ sob atmosfera de ar.

Observa-se que na faixa de temperatura entre 200°C e 300°C ocorreu a perda de massa mais significativa da amostra, de aproximadamente 60%, correspondente à decomposição térmica do bambu, somando compostos voláteis e material carbonáceo. Essa decomposição contínua entre 300 e 400°C com perda de massa de cerca de 20% está provavelmente relacionada à oxidação do carbono formado. A queima do material carbonáceo é um processo exotérmico. Este calor liberado causa um aumento de temperatura como pode ser observado em aproximadamente 420°C. A massa residual ao final da análise TG mostra a formação de cinza com teor de aproximadamente 5%.

A análise TG em atmosfera de N_2 (Figura 5.4) mostra o mesmo perfil de decomposição térmica observada na Figura 5.3, entre 200°C e 300°C, que corresponde à carbonização do bambu. Entre 300°C e 900°C observa-se apenas uma lenta perda de massa que provavelmente tem relação com a formação de estruturas mais estáveis de carbono e perda de moléculas voláteis.

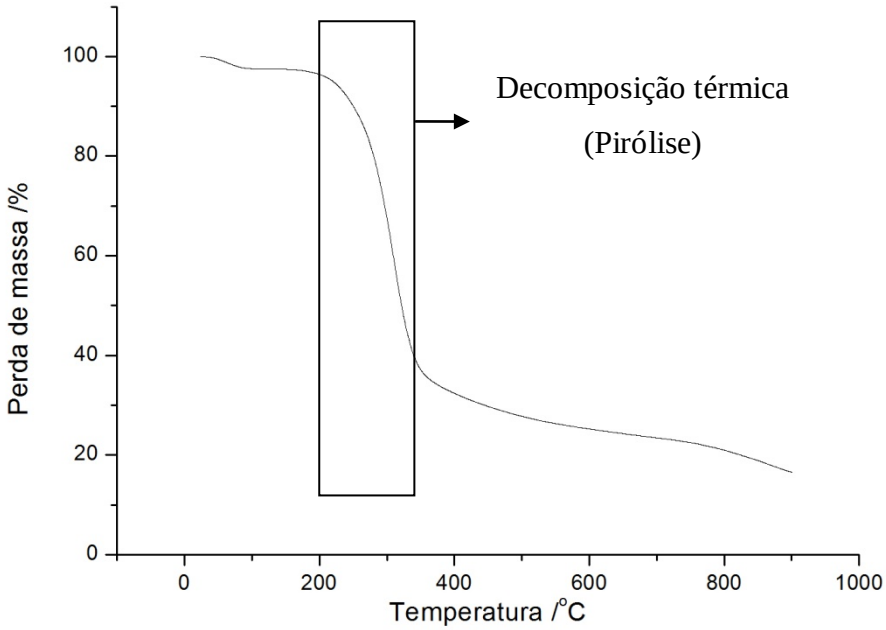


Figura 5.4. TG da amostra $2S_{tot}$ sob atmosfera de N_2.

Pode-se observar 20% de material restante, onde aproximadamente 5% devem ser cinzas, de acordo com a TG em ar, sendo que os 15% restantes devem corresponder à quantidade de carbono.

As mesmas análises foram feitas na amostra $4A_{tot}$, apresentando resultados bastante semelhantes aos da amostra $2S_{tot}$, conforme mostrado nas Figuras 5.5 e 5.6.

Estes resultados sugerem que amostras muito jovens de bambu (2 semanas) não diferem significativamente no comportamento térmico de amostras mais velhas (4 anos).

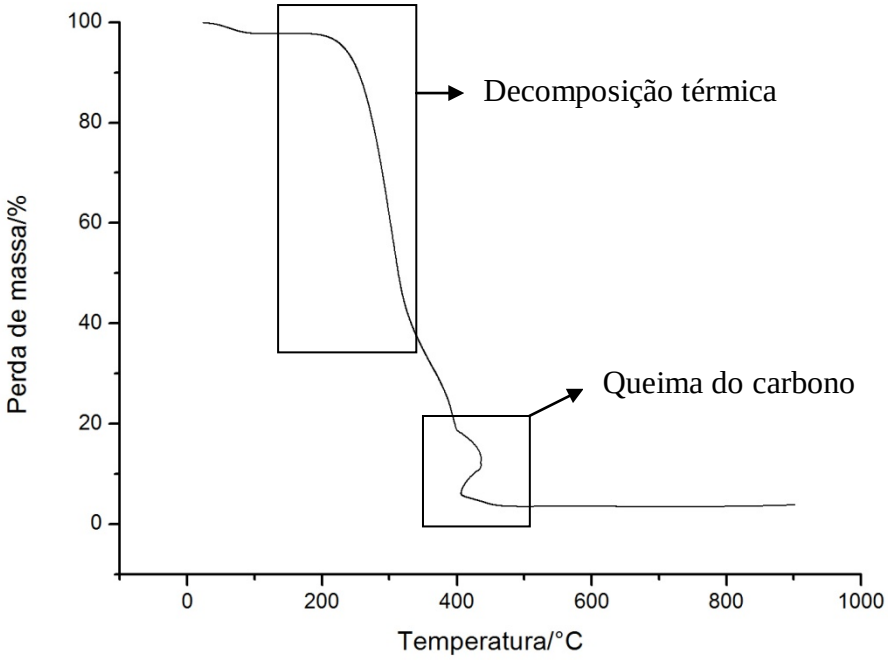


Figura 5.5. TG da amostra $4A_{tot}$ sob atmosfera de ar.

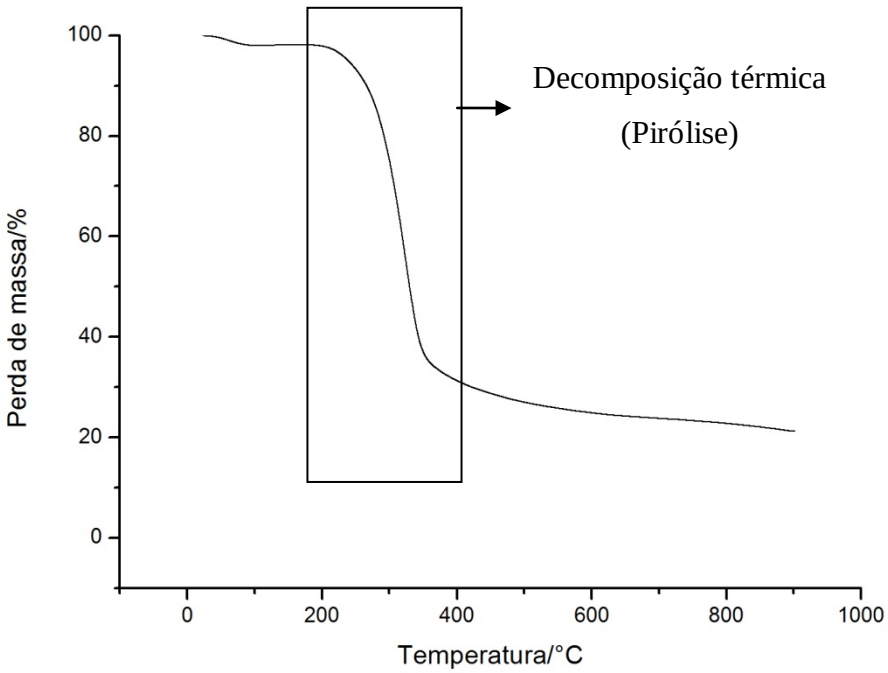


Figura 5.6. TG da amostra $4A_{tot}$ sob atmosfera de N_2.

5.2.2. Pirólise do bambu para produção de carbono

Com base nos resultados da TG, investigou-se a possibilidade de se produzir formas de carbono diferenciadas através da pirólise controlada de bambu. A pirólise foi feita em tubo de quartzo em forno de aquecimento controlado. Figura 5.7 e 5.8.

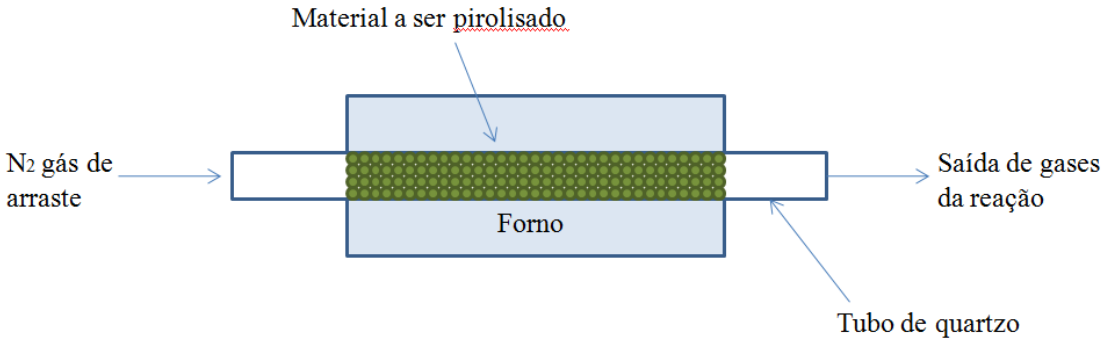


Figura 5.7. Esquema ilustrativo do forno de bancada.

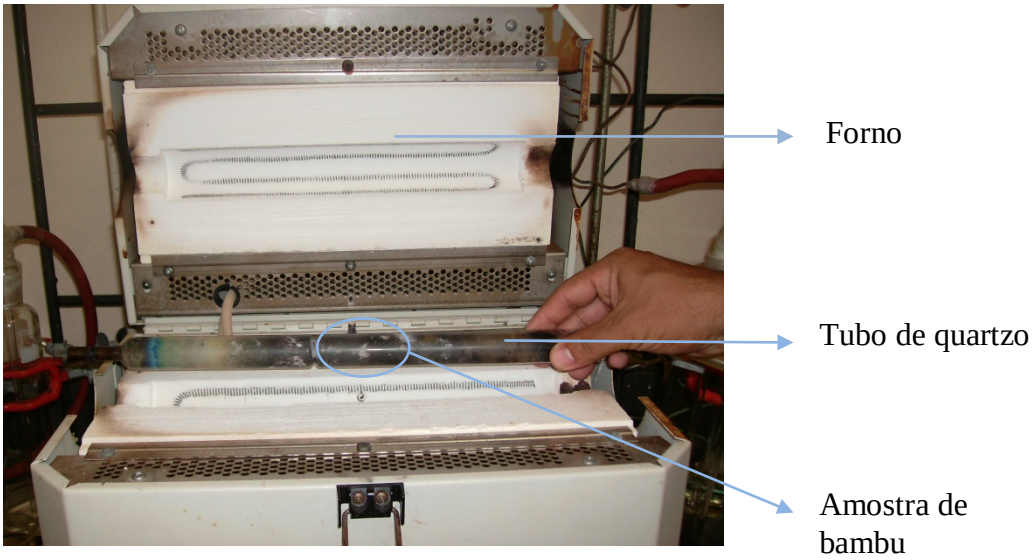


Figura 5.8. Fotografia do forno de bancada.

As amostras obtidas foram analisadas por microscópio óptico usando amostras desfibradas, em seguida por microscopia eletrônica de varredura (MEV) usando amostras em estado natural, trituradas e pirolisadas.

5.2.3. Análise do bambu através de microscópio óptico

Para uma análise preliminar as amostras $4A_{tot}$ foram, antes de serem lixadas, desfibradas manualmente, a fim de se obter uma pequena amostra como mostrado na Figura 5.9.

Figura 5.9. Amostra antes da pirólise.

Desta amostra foram obtidas imagens através de microscópio óptico com aumento de 4, 10 e 40 vezes, respectivamente. Nas imagens puderam-se observar as fibras do bambu (Figura 5.10):

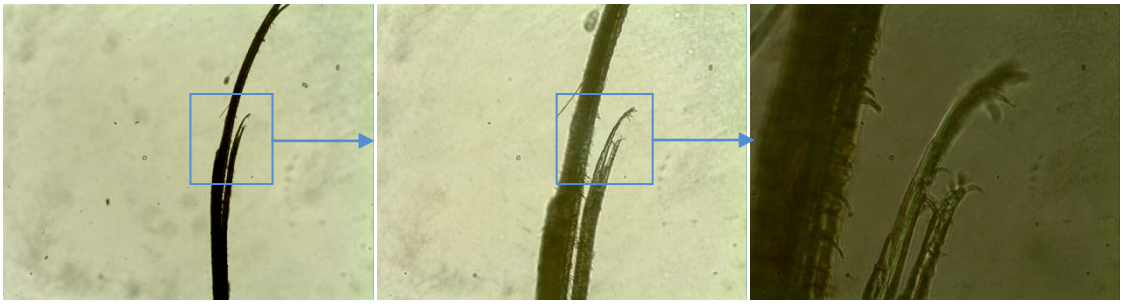
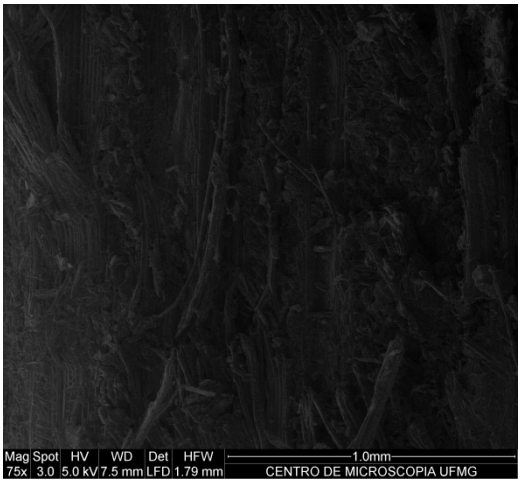


Figura 5.10. Amostra de bambu com aumento de 4, 10 e 40 vezes.

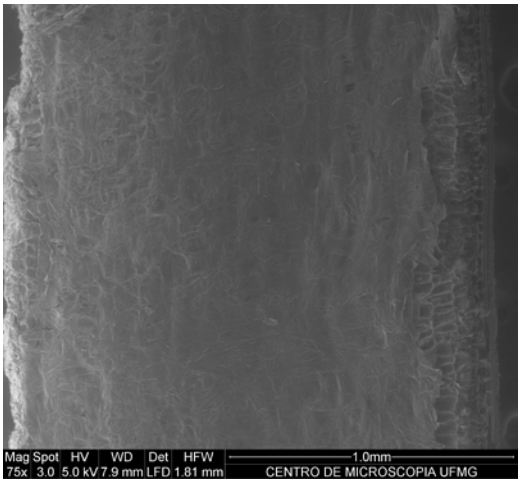
5.2.4. Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

Inicialmente foram feitas micrografias em MEV para as amostras de $4A_{tot,}$ desta vez não desfibradas e sim, lixadas no topo do colmo, a partir de um corte transversal, em estado natural e pirolisado. O objetivo destas análises foi verificar a possibilidade de se fazer fibras

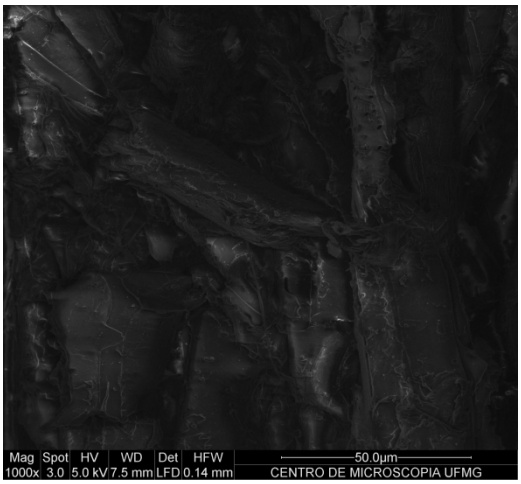
de carbono a partir da fibra de bambu. As primeiras imagens foram feitas com o bambu inteiro, como pode ser observado na Figura 5.11. Nestas imagens é possível perceber claramente a presença das fibras no corpo do bambu.



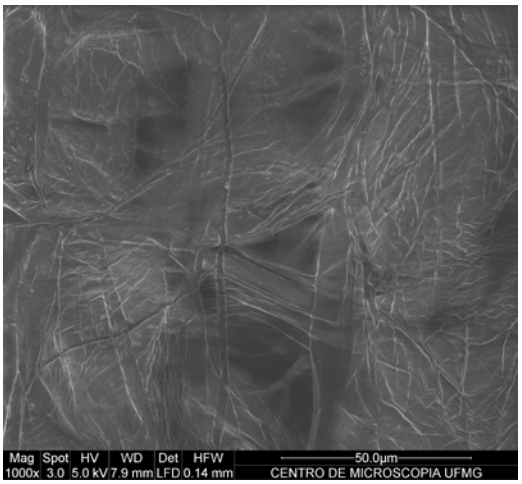
(a)



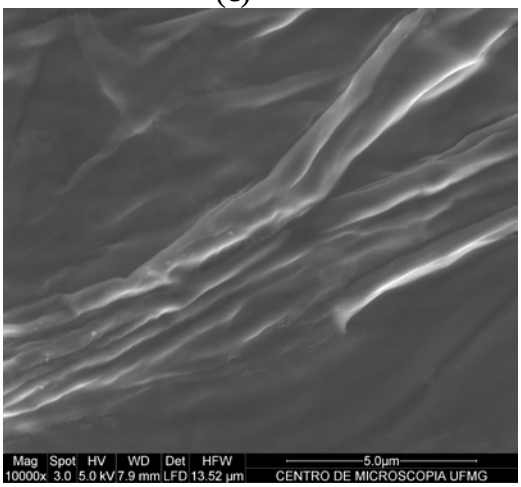
(b)



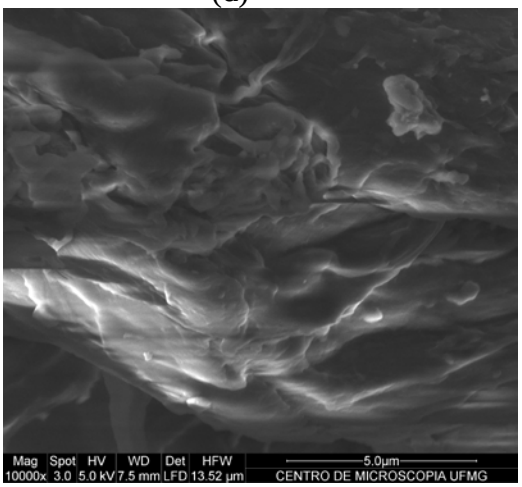
(c)



(d)



(e)



(f)

Figura 5.11. MEV da amostra de bambu inteiro.

As imagens da Figura 5.12, foram feitas a partir de grãos de bambu lixados antes da pirólise. Pode-se observar a presença de aglomerados amorfos com algumas fibras.

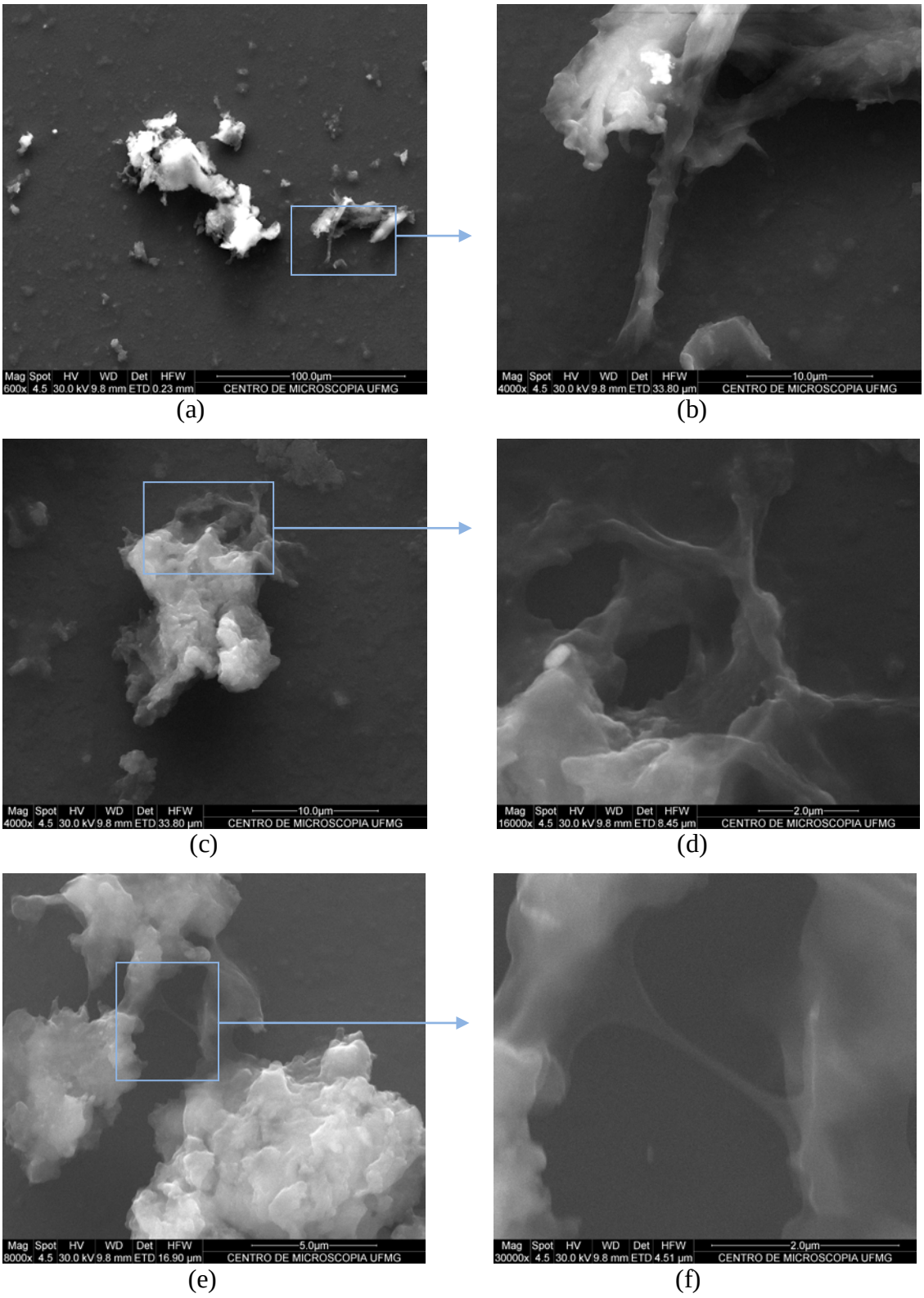


Figura 5.12. MEV da amostra $4A_{tot}$ antes da pirólise.

A Figura 5.13 apresenta a microestrutura do material após a pirólise. Observou-se a presença de lamelas, indicando que o carbono do bambu apresenta o formato de lâminas. (d, e, f)

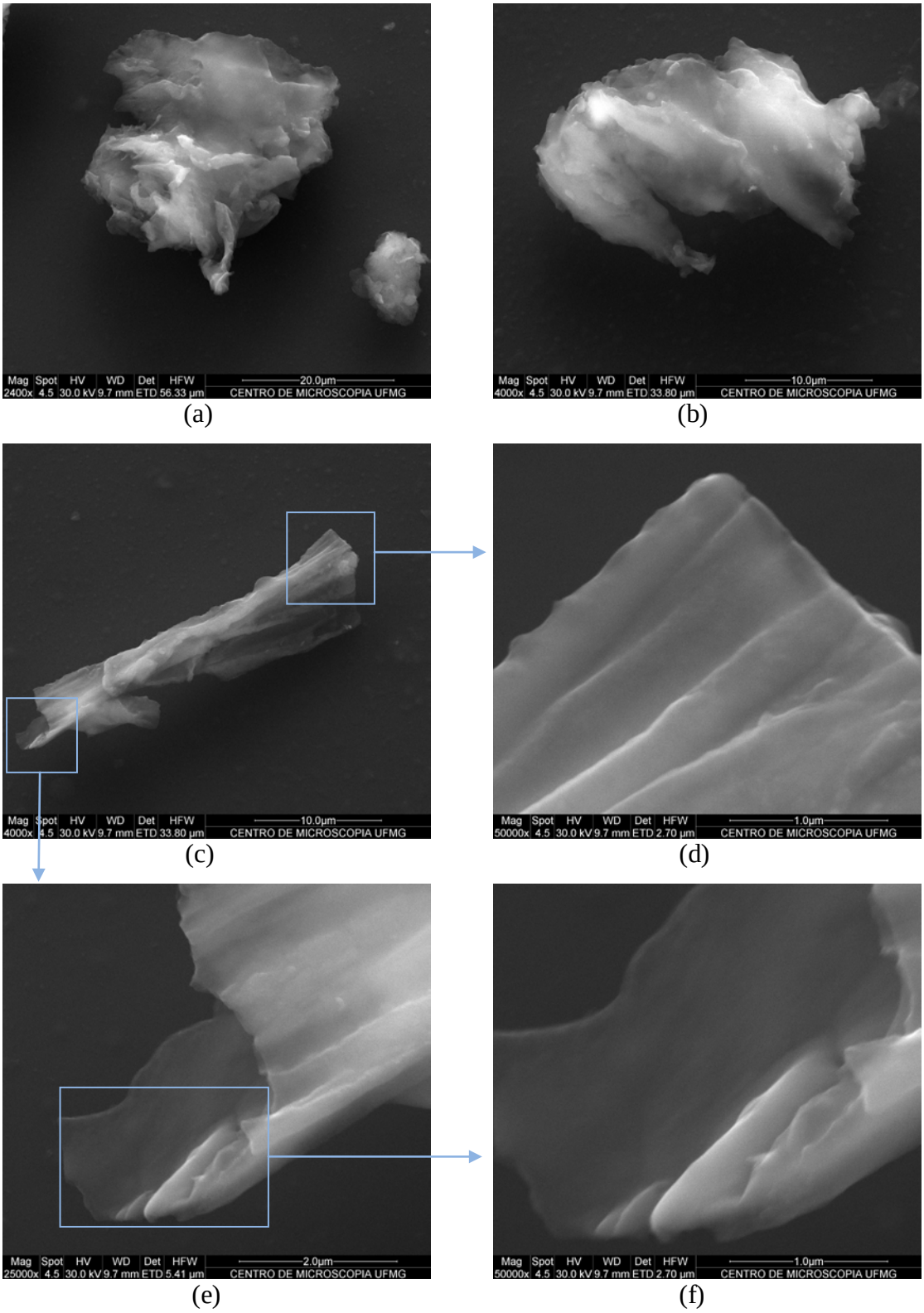


Figura 5.13. MEV da amostra $4A_{tot}$ depois da pirólise.

A partir da conclusão de que o carbono obtido do bambu tinha formato lamelar, surgiu a hipótese de que a fibra do bambu também deveria ter o mesmo formato. Como anteriormente as amostras estavam sendo lixadas transversalmente, as fibras estavam sendo destruídas. Para verificação foram feitas micrografias do bambu desfibrado em formato natural (Figura 5.14) e pirolizado (Figura 5.15).

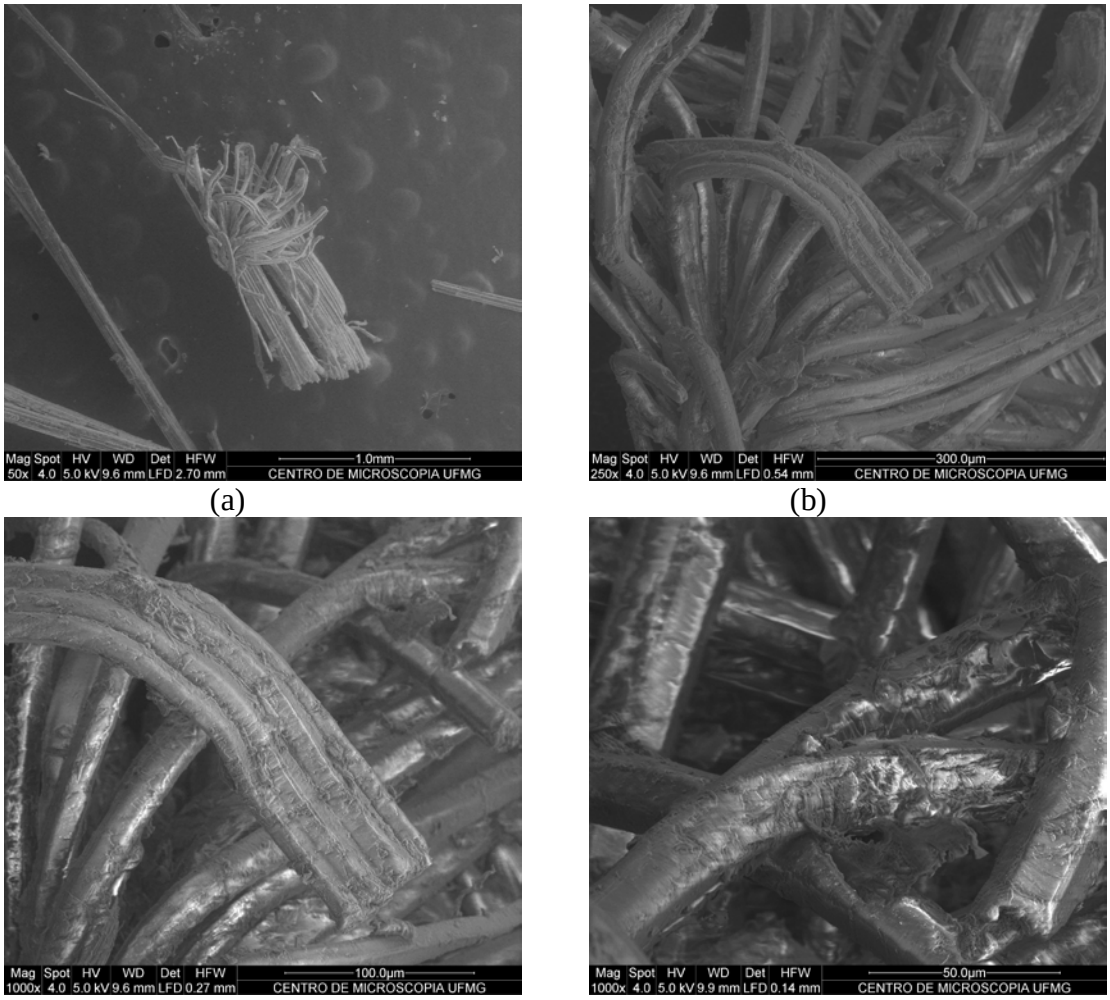


Figura 5.14. MEV de amostras de bambu desfibrado em estado natural.

Quando foram feitas as micrografias do bambu pirolizado, pôde-se observar, além do formato lamelar, a porosidade das fibras de bambu, como pode ser observado na Figura 5.15.

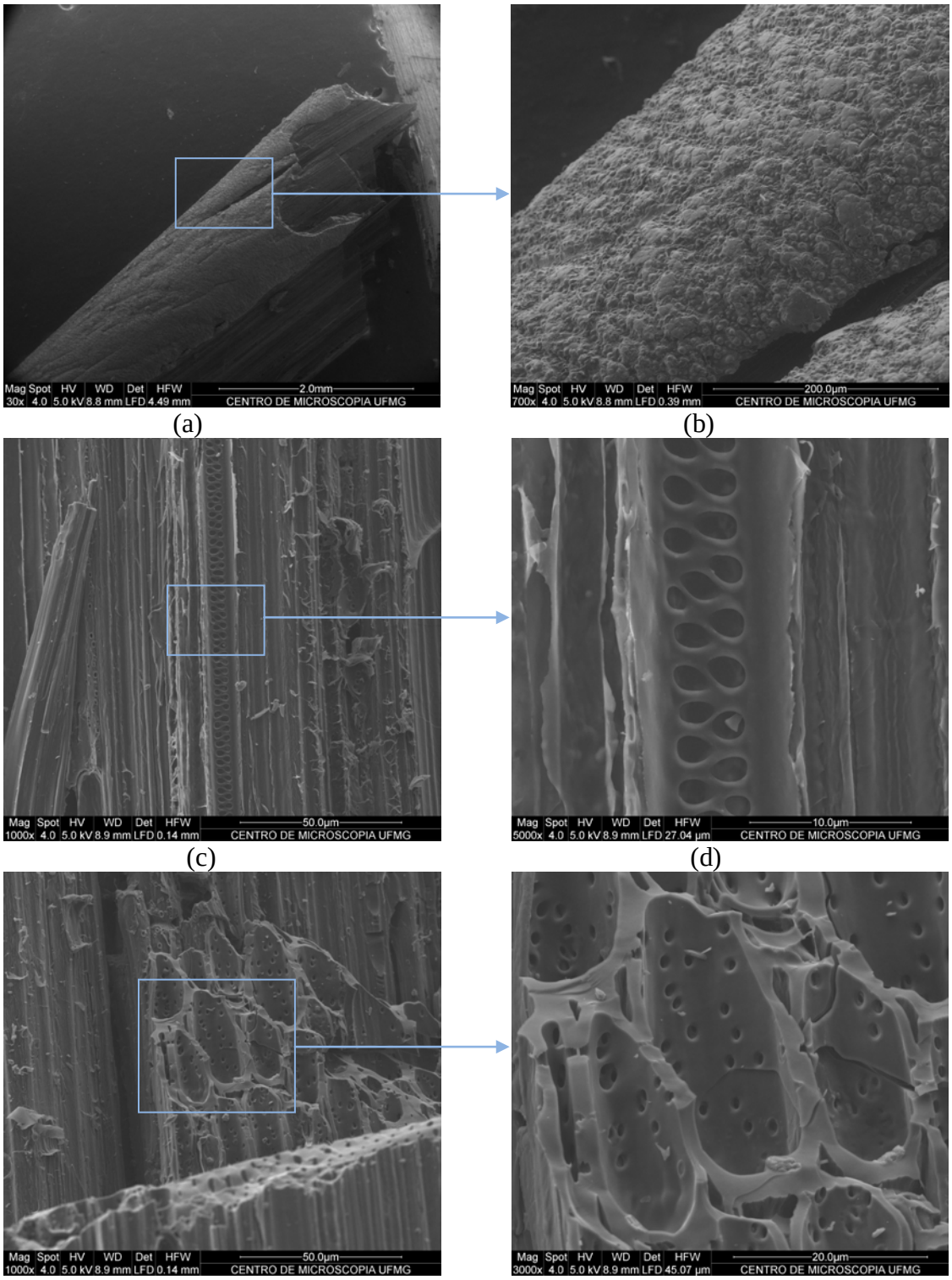


Figura 5.15. MEV de amostras de bambu desfibrado após a pirólise.

5.3. O bambu como agente sequestrador de carbono

Serão mostrados os resultados obtidos a partir das análises em laboratório com o objetivo de verificar e quantificar o sequestro de carbono a partir do bambu. Os testes iniciaram com uma análise elementar de carbono, hidrogênio e nitrogênio (CHN) feita em amostras de bambu de idades diferentes e em diferentes partes do colmo. Os resultados foram comparados com dados já obtidos pela literatura de análises feitas em amostras de eucalipto e pinus.

5.3.1. Determinação do teor de carbono na biomassa do bambu

A Tabela V.3 mostra os resultados obtidos por análise elementar (CHN) das diferentes amostras bambu com variações de idade e pontos da amostra.

O teor médio de carbono encontrado nas amostras de bambu foi de 44,33%. A porcentagem média de hidrogênio foi de 6% para as mesmas amostras e a porcentagem de nitrogênio foi baixa em todas as amostras. Estes valores de CHN são típicos para biomassa vegetal em geral.

Tabela V.3. Análise elementar por CHN das amostras de bambu com variações de idade e pontos da amostra.

Amostra	% C	% H	% N
$2S_{tot}$	42,78	6,47	0,60
$1A_{tot}$	44,04	6,50	0,28
$2A_{tot}$	44,45	6,34	0,31
$2{,}5A_{tot}$	44,12	6,45	0,30
$3A_{tot}$	45,70	6,47	0,29
$4A_{tot}$	44,91	6,23	0,36
$2S_{int}$	41,90	6,06	0,36
$2S_{meio}$	45,29	6,34	0,34
$2S_{ext}$	44,61	6,31	0,71
$4A_{int}$	36,54	5,06	0,68
$4A_{meio}$	45,52	5,98	0,29
$4A_{ext}$	43,86	6,30	0,67

Quando comparado com serragem de *Eucalyptus* sp[28], os teores de C, H, e N, apresentaram resultados bastante semelhantes, como pode ser verificado na Tabela V.4:

Tabela V.4. Análise elementar por CHN de amostra de bambu *Eucalyptus* sp.

Material	**% C**	**% H**	**% N**
Serragem de *Eucalyptus* sp	45,5	6,2	0,13

A Figura 5.16 mostra que o teor de carbono aumenta levemente de 42-43% até 44-45% com a idade do bambu. Esses teores foram obtidos para as amostras contendo todas as partes do colmo de cada idade (amostras $2S_{tot}$, $1A_{tot}$, $2A_{tot}$, $2{,}5A_{tot}$, $3A_{tot}$ e $4A_{tot}$). Este aumento pouco significativo demonstra que o teor de carbono no bambu permanece o mesmo independente da idade.

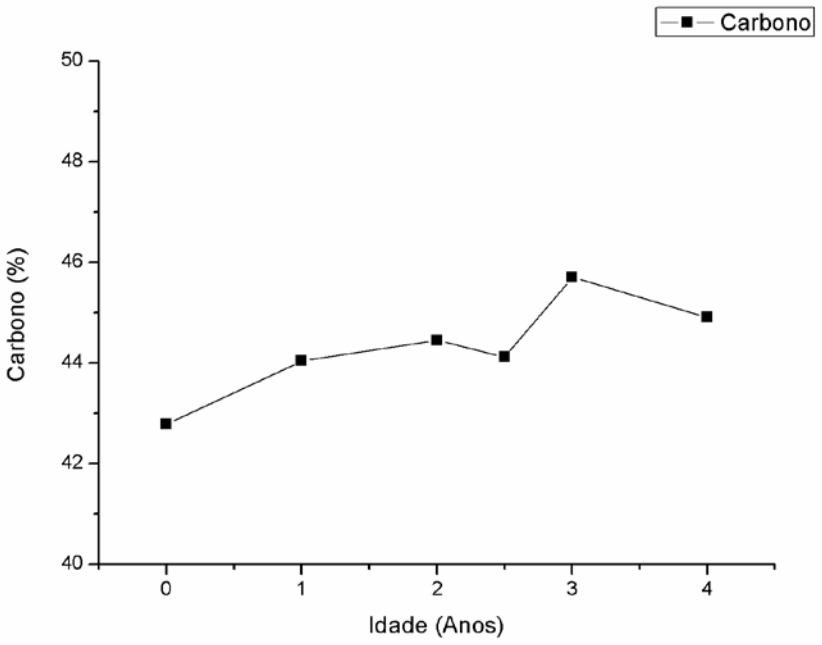


Figura 5.16. Percentual de carbono de acordo com a idade do bambu.

Quando foram analisadas separadamente os três pontos principais do colmo, parte externa, interna e do meio, observou-se que o teor de carbono é levemente mais baixo na parte interna do colmo, sendo que esta diferença aumenta com o aumento da idade (Figura 5.17). O mesmo acontece com os teores de hidrogênio. Os teores de nitrogênio para esta pesquisa não foram considerados.

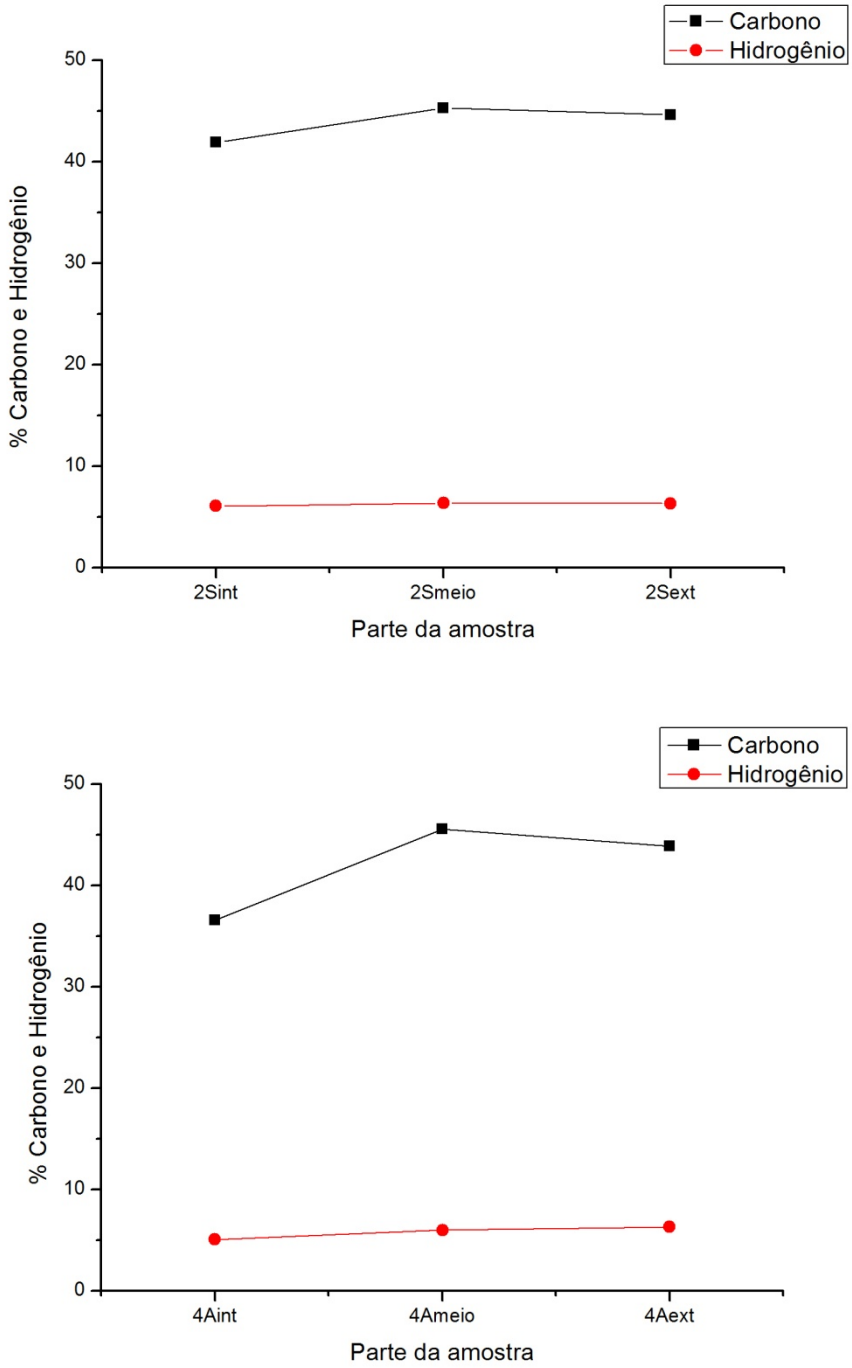


Figura 5.17. Percentual de carbono e hidrogênio nas diferentes partes do colmo de amostras de 2 semanas e 4 anos.

5.3.2. Estimativa da absorção de CO_2 pelo aumento da biomassa do bambu

Foram realizados cálculos considerando a taxa de crescimento do bambu e o conteúdo de carbono para se determinar a absorção aproximada de dióxido de carbono (CO_2).

Como mostrado anteriormente no item 3.3 da revisão bibliográfica[19], o sequestro de carbono é uma medida de quanto carbono a planta tira do meio ambiente e incorpora em sua biomassa (Figura 5.18). Durante o processo de fotossíntese, na presença de luz, as plantas retiram o CO_2, utilizam o carbono para o seu desenvolvimento e retornam o oxigênio para a atmosfera. Esse carbono acumulado só se perde quando há queima da planta. Quando transformamos o bambu, ou qualquer outra planta em produtos (móveis, por exemplo), estamos armazenando o carbono e minimizando os problemas ambientais.

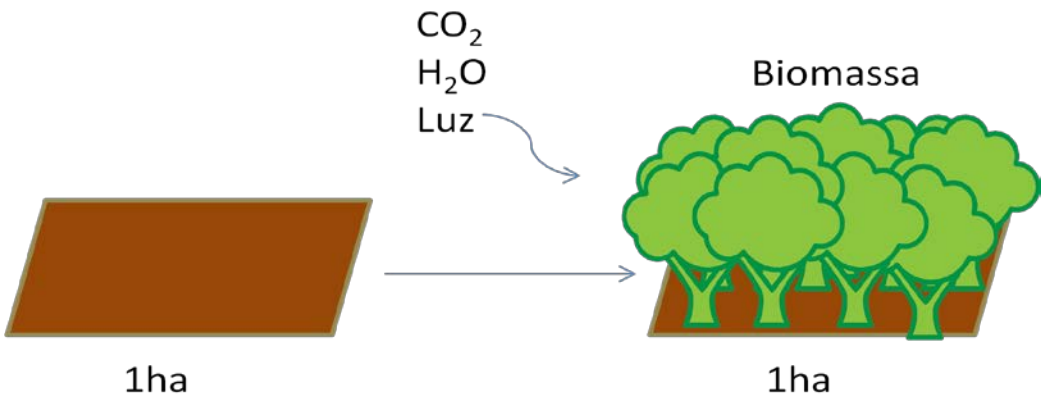


Figura 5.18. Crescimento da biomassa nas plantas.

Isto está relacionado com o ciclo de produtividade e velocidade de crescimento das espécies, pois quanto mais rápido o crescimento da planta, maior acúmulo de biomassa e mais sequestro de carbono.

A Tabela V.5 mostra a produtividade e o ciclo da cultura para três espécies diferentes: pinus, eucalipto e bambu[29]. Observa-se que a produtividade de bambu (40-60 t/ha.ano) é próxima a do eucalipto (30-50 t/ha.ano) e maior que a do pinus. No entanto, o ciclo do bambu é de apenas 2-6 anos. Isso significa que o tempo de plantio e colheita do bambu é de 2 a 6 anos enquanto o eucalipto varia de 7 a 10 anos.

Tabela V.5. Comparativo de produtividade Pinus x Eucalipto x Bambu[29]

	Pinus	**Eucalipto**	**Bambu**
Ciclo cultural - anos	15-25	7-10	2-6
Produtividade - t/ha.ano	25-35	30-50	40-60

Se uma plantação de bambu produz em média 50 toneladas de bambu por hectare em um ano, e sua composição possui 44% de carbono, então um hectare de bambu retém em média 22 toneladas de carbono por hectare por ano. O eucalipto, por exemplo, retém em média, produzindo 40t/ha.ano, 17,6 toneladas de carbono por hectare por ano, significando uma diferença média de 20% a mais.

Essa diferença considera apenas a produtividade, unindo isso ao ciclo cultural de cada espécie, podemos ilustrar a seguinte situação:

Considerando a taxa média de produtividade de cada espécie, tem-se que o pinus produz em média, 30t/ha.ano, o eucalipto 40t/ha.ano e o bambu 50t/ha.ano. Supondo uma área onde as três espécies são plantadas ao mesmo tempo, em 2 anos poderá ser feito o primeiro corte do bambu, em sete anos o primeiro corte do eucalipto e em 15 anos o primeiro corte do pinus. Ainda, segundo dados da Associação Catarinense de Bambu[29], o bambu dispensa o replantio por mais de 100 anos. Novos brotos surgem espontaneamente a cada ano. O pinus é replantado depois de cada corte, ou seja, a cada 15 anos, o eucalipto rebrota após o corte, porém deve ser replantado depois de 4 ciclos, isto é, no 28º ano. Colocando estes dados em uma tabela, observa-se que:

Tabela V.6. Comparativo de produtividade do pinus, eucalipto e bambu durante 15 anos expressas em toneladas (t).

Ano	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	Total
Pinus															30	30
Eucalipto							40							40		80
Bambu		50		50		50		50		50		50		50		350

Ano sem colheita

Colheita

Se a produção média do bambu é de 50t/ha.ano, e essa colheita pode ser feita a cada dois anos, significa que a cada colheita estamos armazenando cerca de 45% de carbono por espécie. Mesmo que a porcentagem de carbono do pinus e do eucalipto sejam semelhantes à porcentagem de carbono armazenada pelo bambu, se as espécies forem colhidas no tempo certo de colheita e armazenadas, ao longo de 15 anos teremos armazenados cerca de 14t de carbono pelo pinus, 35t pelo eucalipto e 154t pelo bambu.

Considerando novamente a média de produção anual do bambu de 50t/ha.ano tem-se que, para cada carbono armazenado, foi sequestrado uma molécula de CO_2, e lembrando que a massa molar do CO_2 é 44g/mol, a do carbono 12g/mol e que em 1t temos 1.000.000g. Como vimos que anualmente acumula-se em média 22t de carbono em 1ha de bambu, e multiplicando estes valores a razão entre as massas molares do CO_2 e do carbono, conclui-se que:

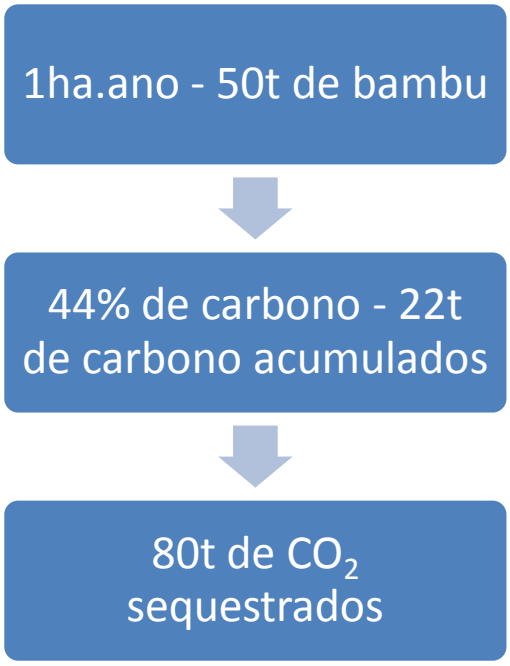


Figura 5.19. Estimativa de sequestro de CO_2 pelo bambu.

Fazendo os mesmos cálculos para o pinus e para o eucalipto tem-se que o pinus sequestra por ano uma média de 47t de CO_2 e o eucalipto 63t. Essa diferença justifica a hipótese do bambu ser um eficiente sequestrador de carbono.

5.4. Compósitos de fibras de bambu/polímeros

Compósitos são materiais formados por dois ou mais componentes, com diferentes composições, estruturas e propriedades, e que, quando combinados, formam um novo material com propriedades superiores às dos elementos sozinhos.

Sendo assim, o objetivo deste tópico da pesquisa foi formar um compósito usando fibras de bambu em uma matriz polimérica, neste caso o polietileno de baixa densidade (PEBD). O PEBD foi escolhido para este experimento por possuir propriedades térmicas próximas às do bambu.

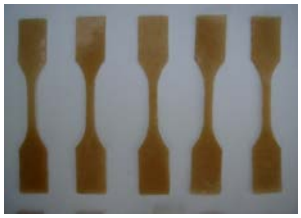
Foram processadas sete amostras conforme descrito no item 4.4. Em seguida essas amostras foram pesadas em balança de precisão digital e codificadas de acordo com a quantidade de cada elemento (Tabela V.7). Com os corpos de prova preparados, foram feitas as análises cujos resultados serão apresentados a seguir.

A codificação representa o percentual dos elementos presentes na amostra, sendo que todas as amostras contêm PEBD. O primeiro algarismo representa o percentual de bambu, o segundo o percentual de compatibilizante (PE-g-AM) e os dois últimos o percentual de plastificante (glicerol).

Exemplo:

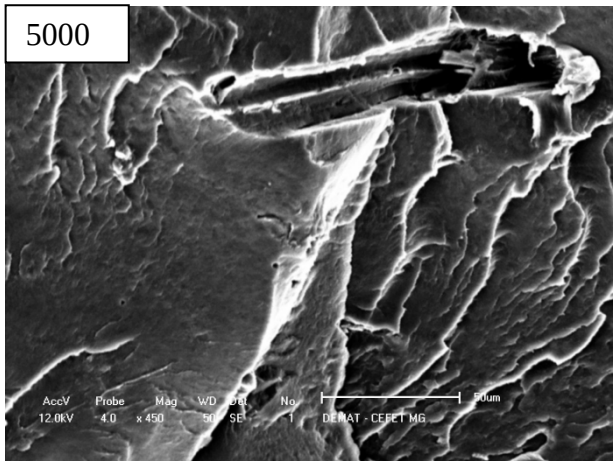
5305 – 5% de bambu
3% de PE-g-AM
5% de glicerol

Tabela V.7. Amostras para testes do compósito.

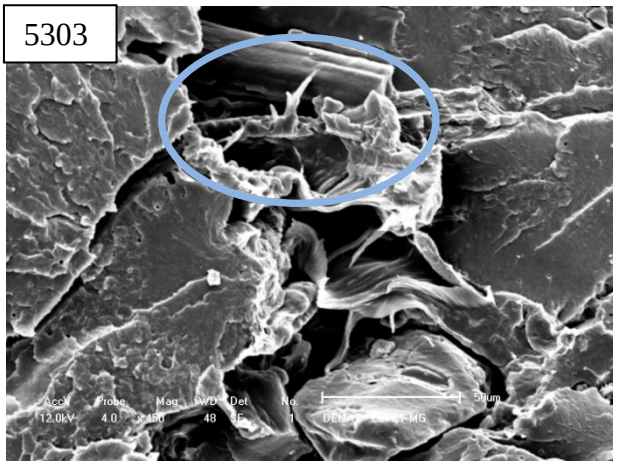
Amostra	Material	Peso (g)	Imagem dos corpos de prova
5300	Bambu PEBD PE-g-AM	2 36,86 1,14	
5305	Bambu PEBD PE-g-AM Glicerol	2 36,86 1,14 2	
5000	Bambu PEBD	2 38	
5303	Bambu PEBD PE-g-AM Glicerol	2 36,86 1,14 1	
5003	Bambu PEBD Glicerol	2 38 1	
0000	PEBD	40	
5500	Bambu PEBD PE-g-AM	2 36 2	

5.4.1. Microscopia eletrônica de varredura (MEV):

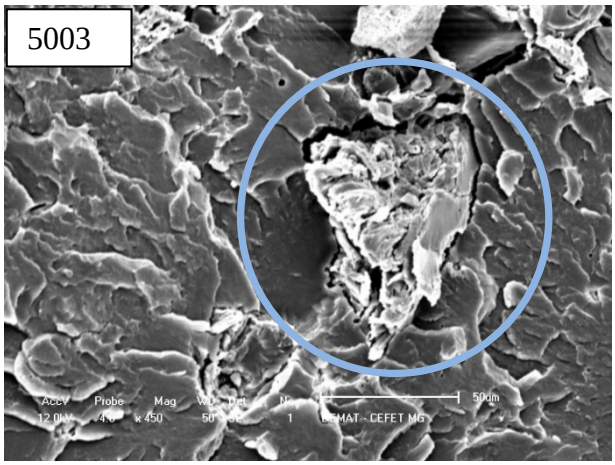
A Figura 5.20 mostra micrografias da superfície de fratura criogênica dos compósitos PEBD/Bambu, sem aditivos (Figura 5.20-a) com aditivos PE-g-AM e glicerol (Figura 5.20-b) e somente com glicerol (Figura 5.20-c). Em todos os materiais compósitos, duas fases podem ser vistas, uma contínua associada com o polietileno e outra que foi puxada para fora da matriz no processo de fratura, em forma de fibra, relacionada com a fase bambu. O modo de fratura do polietileno é semelhante nas fases contínuas. Lee et al.[30] investigou um biocompósito de polímeros biodegradáveis e fibras de bambu e obteve micrografia que mostrou um comportamento similar da fibra.



(a)



(b)



(c)

Figure 5.20. MEV fotografia da superfície dos compósitos PEBD/Bambu com e sem aditivos.

Além disso, os vazios (em destaque na figura) entre as fases ficaram visíveis na microscopia, e indicam baixa adesão interfacial entre a carga e a matriz. Estas características são típicas de compósitos poliméricos incompatíveis. No entanto, a micrografia do compósito após a incorporação do compatibilizante (PE-g-AM) (Figura 5.20-b) mostrou uma redução das lacunas e indicou um aumento da compatibilidade entre a matriz e a carga. Este aumento da adesão interfacial pode ser atribuído à interação entre os grupos carboxílicos do anidrido maleico que compõe o copolímero PE-g-AM e as hidroxilas presentes na estrutura de bambu. Provavelmente, tal interação foi promovida pelas condições de processamento em altas temperaturas e pressão.

Por outro lado, a micrografia referente à amostra sem compatibilizante e com adição de glicerol (Figura 5.20-c), revelou grandes vazios. Tal resultado sugere que a adição de um plastificante (glicerol), para melhorar as condições de processamento e com isso aumentar a eficiência de mistura entre a matriz e a carga, não foi eficiente para evitar a fraqueza da interação entre as fases. Neste caso, a estrutura química do glicerol, com grupos hidroxila, pode ter favorecido a interação entre o glicerol e as fibras de bambu que também contém grupos hidroxila. Portanto, pode ter ocorrido um aumento na diferença de polaridade entre a matriz e as fibras embebidas em glicerol acarretando no aumento da segregação entre as fases.

5.4.2. Testes Mecânicos

As curvas tensão-deformação para os compósitos PEBD/Bambu, com e sem a incorporação de glicerol e/ou PE-g-AM são apresentados na Figura 5.21. A incorporação de bambu no polietileno resultou em uma diminuição das propriedades mecânicas, principalmente no limite de resistência a tração, quando comparados ao PEBD puro. Este resultado pode ser atribuído a fraca adesão das fibras de bambu na matriz fazendo com que as mesmas passassem a atuar como defeitos ao invés de reforço. Tal comportamento dificulta que as tensões sejam absorvidas pela carga de forma eficiente e, portanto, não evita a propagação de trincas, tornando-os menos resistentes quando submetidos ao esforço de tração. A queda de tensão na ruptura com a incorporação do bambu em poliolefinas foi descrita previamente[31].

No entanto, pode-se observar que o alongamento de ruptura aumentou com a incorporação do compatibilizante, fato que pode ser atribuído ao aumento da compatibilidade entre as fases, como sugerido pela micrografia obtida por MEV. Porém, o alongamento de ruptura diminui após a incorporação de plastificante nos compósitos, e mais uma vez corrobora com os resultados de MEV.

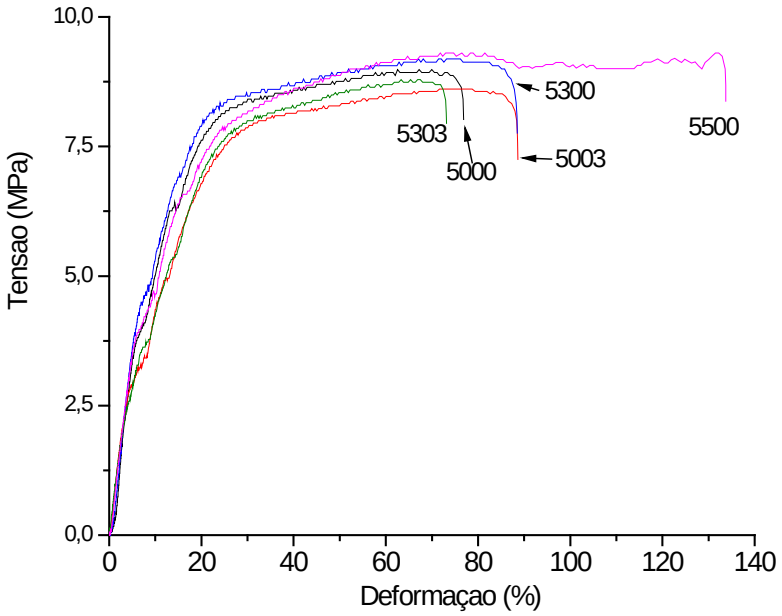


Figura 5.21- Curvas tensão-deformação para os compósitos de PEBD/Bambu.

5.4.3. Experimentos de medida de ângulo de contato

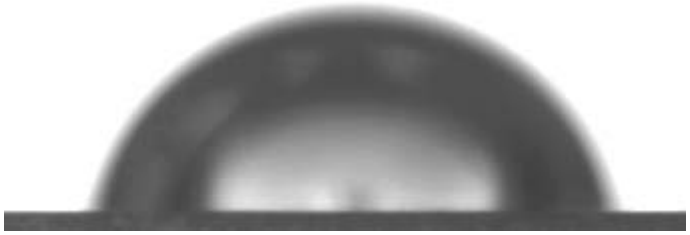
Quando a água é gotejada sobre uma superfície as gotas podem se comportar entre dois extremos: espalhar-se sobre a superfície em contato ou minimizar o contato com a superfície. Isso dependerá das forças intermoleculares que se estabelecem entre as fases. A água é um líquido polar, portanto, se a superfície com a qual a água entra em contato for polar, ocorrerão interações fortes entre as moléculas da água e os grupos também polares da superfície, molhando assim a superfície. Mas, se a superfície em contato for apolar, não ocorrerão interações fortes entre as moléculas da água e a superfície em contato. Como resultado, a água tenderá a atingir o estado de menor energia, ou seja, as moléculas da água irão interagir com elas mesmas, diminuindo o contato com a superfície, formando uma gota.

Pode-se avaliar o comportamento do espalhamento da gota de água sobre uma superfície através da medida do ângulo de contato. Segundo esse critério teremos:

• Para $\theta = 0°$, a superfície é totalmente hidrofílica;
• Para $0° < \theta < 90°$, a superfície é predominantemente hidrofílica;
• Para $90° < \theta < 180°$, a superfície é predominantemente hidrofóbica;
• Para $\theta = 180°$, a superfície é totalmente hidrofóbica.

O comportamento de espalhamento da gota durante os experimentos de medida do ângulo de contato entre a água e as amostras 0000 (PEBD puro), 5300 (bambu, PEBD e PE-g-AM), e 5305 (bambu, PEBD, PE-g-AM e glicerol) está ilustrado na Figura 5.22 (a, b e c).

(a) Amostra 0000 ($\theta = 137{,}9^0$)



(b) Amostra 5300 ($\theta = 75{,}8^0$)

(c) Amostra 5305 ($\theta = 59{,}7^0$)

Figura 5.22 – Medidas de ângulo de contato para os compósitos de PEBD/Bambu.

A partir desses resultados fica claro que a presença das fibras de bambu aumentou o caráter hidrofílico da superfície hidrofóbica do polietileno. Este resultado pode ser atribuído aos grupos hidroxila e outros grupos polares localizados nos hetero polissacarídeos ramificados presentes nas fibras de bambu fazendo com que a superfície das fibras tenha caráter hidrofílico[32].

O glicerol age como plastificante e foi adicionado para melhorar a processabilidade do compósito. Por outro lado, o glicerol pode formar ligações de hidrogênio fortes com as hidroxilas presentes nas fibras de bambu[33]. Conforme esperado, os resultados encontrados indicaram que a presença do glicerol aumentou a hidrofilicidade da superfície do compósito.

Em resumo, as microscopias revelaram espaços vazios que demonstraram que as fibras de bambu tiveram baixa adesão interfacial com a matriz de PEBD, o que demonstrou incompatibilidade entre as fases na formação do compósito. Tal comportamento resultou em uma diminuição das propriedades mecânicas em relação ao polímero puro. A adição do compatibilizante (no caso o PE-g-AM) promoveu o aumento da interação entre a matriz e a carga que se traduziu no aumento do alongamento de ruptura. Com a adição do plastificante (glicerol) houve um aumento da diferença de polaridade entre as fases e, portanto, uma redução na interação entre as fases, e uma diminuição do alongamento na ruptura.

As medidas de ângulo de contato demonstraram que a presença de fibras de bambu aumentou o caráter hidrofílico da superfície hidrofóbica do polietileno e a presença do glicerol potencializou esse aumento.

5.5 – Uso do bambu na construção civil em comparação ao aço

Vários estudos mostram que o bambu pode ser usado em substituição ao aço na construção civil. A significativa relação resistência/peso, associada ao baixo custo do material, tem mostrado que ele pode ser um bom substituto à madeira e ao próprio aço de construção.

Como componente de construção, o bambu pode ser utilizado na forma inteira (roliça) e, neste caso, empregado na construção de tesouras, pilares, vigas, etc.; na forma partida (talisca), como reforço ao concreto; e, na forma de placas de réguas de bambu trançado, empregado na construção de muros, paredes, forros, assoalhos, etc. O bambu permite ainda a associação com outros materiais de construção, tais como, solo-cimento, argamassa armada, concreto e gesso[34].

O Profº. Khosrow Ghavami do Departamento de Engenharia Civil da PUC-Rio[35], vem desenvolvendo pesquisas sobre a substituição do aço pelo bambu na fabricação de estruturas de concreto. Segundo ele, o material tem resistência suficiente para ser utilizado na fabricação das estruturas. Nos ensaios realizados, o bambu apresentou resistência à tração de 200 MPa, índice próximo aos 240 MPa apresentados por uma chapa de aço. Uma das principais vantagens do uso do bambu é a economia. Pelos cálculos do Profº. Ghavami, a utilização pode reduzir em mais de 30% o custo final da construção.

A Tabela V.8 mostra um comparativo entre madeira maciça, bambu e tubo de aço, todos com 2,5 metros de comprimento e com o mesmo peso de 8,7kg[36]. O momento de inércia do bambu é bem superior ao do aço o que proporciona maior resistência a flambagem, além disto, é menos da metade do preço e tem um “ecocusto” 50 vezes menor.

Tabela V.8. Comparação de materiais. Adaptado de Obermann [36].

Força de compressão nas hastes de 2,5m	**Madeira** S10/MS10	**Bambu** *Guadua angustifólia kunth*	**Aço** S235
Densidade kg/m^3	550	700	7800
Módulo de Elasticidade N/mm^2	7400	6000	210000
Seção de corte	D=9cm	D=12cm d=9cm	D=5,1cm d=4,5cm
Área A cm²	63,6	49,5	4,4
Peso kg	8,7	8,7	8,7
Ecocusto $\frac{MJ/m^2}{N/mm^2}$	80	30	1500

A relação entre a resistência à tração e o peso específico é uma característica importante para o material usado em estruturas. Ghavami[37] mostra que esta relação para o bambu é 2,73 vezes maior do que para o aço (Tabela V.9). Um benefício disto é que as estruturas de bambu poderão possuir menor peso.

Tabela V.9. Relação entre a resistência a tração e o peso específico. Adaptado de Ghavami[37].

Material	**Resist. Tração (N/mm²)**	**Massa específica³ W (N/mm² x 10^{-2})**	**R= $\frac{t\sigma \times 10^4}{w}$**	**R/R.aço**
Aço (CA 50A)	500	7,83	0,64	1,00
Bambu	140	0,80	1,75	2,73

5.5.1. Substituição do aço pelo bambu: um estudo sobre a eco-eficiência

Nesta parte do trabalho será comparado de forma preliminar o impacto ambiental da substituição do aço pelo bambu na construção civil. Para isso foram selecionados seis parâmetros: liberação de CO_2, energia (ecocusto), peso específico, consumo durante o transporte, emissão de CO_2 durante o transporte e custo para construção de uma casa popular de 32m^2.

Para cada parâmetro foi feito um levantamento bibliográfico. Em seguida foram realizados alguns cálculos, os quais serão explicados a seguir para se manter uma única unidade de medida, no caso o m^3, pois o bambu será usado em substituição ao aço em uma construção baseado no volume.

Tabela V.10. Comparação entre bambu e aço de acordo com os parâmetros estabelecidos.

Parâmetro (m^3)	**Bambu**	**Aço**
Liberação de CO_2	**18,72**kg /m^3	**9420**kg/m^3
Energia	**30**MJ/m^3	**1500**MJ/m^3
Peso específico	**500**kgf/m^3	**7850**kgf/m^3
Custo do material em casa popular de 32m^2	R$ **4.300**,00/m^3	R$ **6.880**,00/m^3
Consumo de Diesel no transporte	**0,635**l/100km/m^3	**10,16**l/100km/m^3
Emissão de CO_2 no transporte	**1,711**kg/100km/m^3	**27,38**kg/100km/m^3

Explicação dos parâmetros:

Liberação de CO_2:

Conforme dados da Agenda 21 para a construção sustentável[38], o aço emite 1,2t de CO_2 por tonelada produzida. Segundo Ghelmandi Netto[39], o bambu também emite CO_2 durante seu processo produtivo o que pode ser observado na tabela seguinte:

Tabela V.11. Emissões diretas de CO_2 por período ao longo de 25 anos de vida útil da plantação de bambu. Adaptado de Ghelmandi Netto[39].

Período	**Óleo Diesel Utilizado/ (kg.ha)***	**CO_2 liberado/ (kgCO_2/ha)**	**Percentual de CO_2 liberado**
Implantação	498,42	1.844,17	16%
Adaptação	809,27	2.994,29	29%
Operação	1.856,44	6.868,82	59%
Total – CO_2		11.707,28	100%

*Todo óleo diesel utilizado na plantação durante seus 25 anos de vida útil foi multiplicado pelo seu potencial de emissão de CO_2 (3,7) kg CO_2/kg diesel)

Estes dados de emissão de CO_2 pelo bambu em uma plantação durante 25 anos foram divididos para se estabelecer a quantidade emitida em um ano por ha. Em seguida, calculou-se qual seria a emissão por m^3. Então tem-se que:

11.707,28kgCO_2/ha durante 25 anos = 468,2912kgCO_2/ha.ano = 0,468tCO_2/ha.ano.

Considerando que 1m³ de bambu equivale 0,5t, e conforme dados apresentados anteriormente, a produção média anual de bambu é de 50t/ha.ano, então:
1ha – produz 50t de bambu e libera 0,468t de CO_2.

1t de bambu libera 0,00936t de CO_2 em 1m³, temos 0,5t, ou seja, liberação de 0, 01872t/m³ ou 18,72kg de CO_2/m³.

Para o aço bastou saber que em 1m³ estão presentes 7,85t. Fazendo a divisão tem-se que a liberação de CO_2 para a produção de 1m³ de aço é de **9420**kg e para a produção de 1m^3 de bambu é de **18,72**kg.

Energia:

O bambu necessita de baixo consumo de energia para a sua produção. A Tabela V.12[40] apresenta uma comparação da energia necessária para a produção de vários materiais de construção com suas tensões de compressão, utilizadas em cálculos estruturais. Percebe-se que, para o aço resistir a uma mesma tensão que o bambu, ele consome 50 vezes mais energia.

Tabela V.12. Comparação da energia gasta em MJ para produzir 1m^3 por unidade de tensão[40]

Material	**Bambu**	**Madeira**	**Concreto**	**Aço**
MJ/m3/MPa	30	80	240	1500

Peso específico:

O peso específico é definido como peso por unidade de volume (N/m³) como apresentado na Tabela V.8. O peso específico de 1m³ de bambu é de 500kgf e do aço, 7850kgf.

Transporte:

Segundo dados da Mercedes Benz[41], um caminhão do modelo Actros, por exemplo, consome 1,27 litros de combustível por tonelada transportada em uma distância de 100 km. Usando os dados conseguidos anteriormente, verifica-se que 1m³ de aço equivale a 7,85t, e 1m³ de bambu 0,5t. Ou seja, para o transporte de 1m^3 de aço, gastam-se 9,96 litros de combustível a mais para se percorrer a mesma distância, enquanto que para o transporte do bambu, se gasta apenas 0,63 litros a mais.

Emissão de CO_2 durante o transporte:

Segundo dados da CEPEA – Centro de Estudos Avançados em Economia Aplicada – USP[42], um litro de diesel consumido gera 2,695kg de gás carbônico. Unindo aos dados do item anterior, calcula-se que para cada m³ de aço transportado, há uma emissão de 26,8422kg de CO_2 a mais, e para cada m³ de bambu, a emissão é 1,6978kg a mais do que o caminhão emitiria vazio.

Custo para construção de uma casa popular de 32m²:

O Instituto do Bambu (INBAMBU)[43] em Alagoas possui um projeto de casas populares feitas de micro concreto de bambu e raspas de pneu, chamado de pré-moldados, reduzindo em 40% o custo de uma casa convencional. O custo de uma casa com 38m² fica em torno de R$ 4.300,00.

Unindo estes dados e colocando em um gráfico do tipo radar, usando parâmetros de porcentagem, podemos perceber a enorme diferença de custos e emissão de CO_2 quando se faz a substituição do aço pelo bambu na construção civil (Figura 5.23).

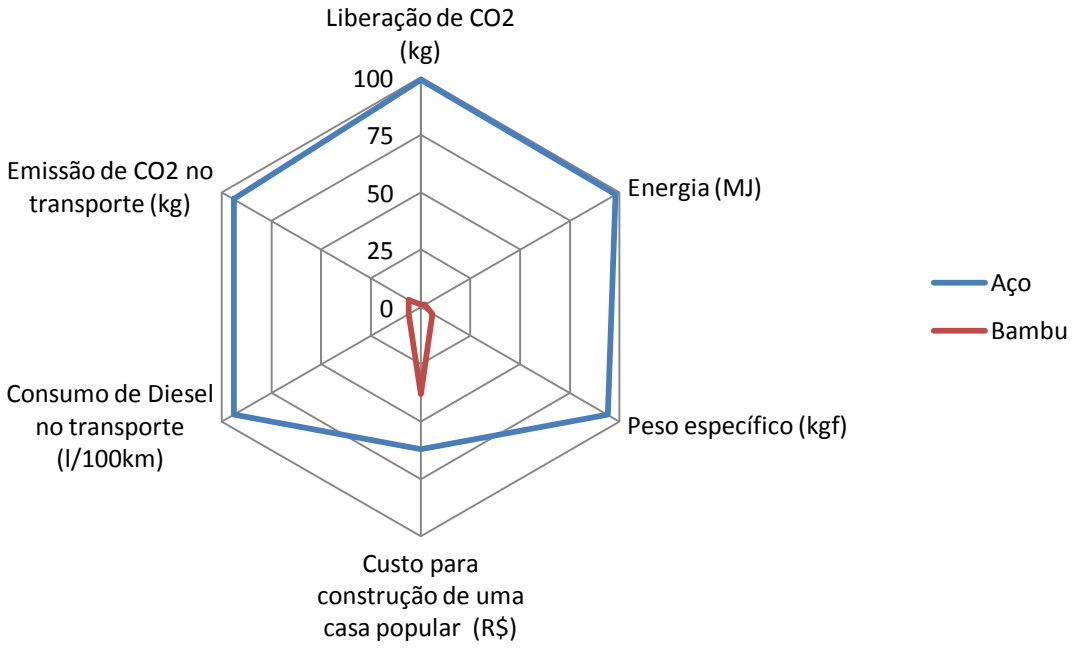


Figura 5.23. Gráfico demonstrativo da diferença entre o uso do bambu em substituição ao aço tratando-se de custos e emissão de CO_2.

Capítulo 6

Conclusões

Os testes de caracterização do material demonstraram que o bambu é termicamente estável até 200ºC e possui um teor de cinzas de cerca de 5%. O rendimento do carbono formado é em torno de 15% e a formação das estruturas de carbono mais estáveis ocorrem entre 300°C e 900°C. Quando analisadas as amostras de idades diferentes, (2 semanas e 4 anos) foi possível observar que ambas possuem características térmicas semelhantes, não apresentando mudanças significativas com o amadurecimento.

Ao ser analisado através do microscópio eletrônico de varredura (MEV) a partir de um corte longitudinal, pode-se observar a estrutura fibrosa da planta, porém após a granulação e pirólise, as imagens mostraram que o bambu possui uma estrutura de carbono lamelar, o que pode ser observado também após a microscopia da fibra a partir de um corte transversal. Essa ultima imagem permitiu ainda observar a porosidade do bambu.

Partindo para a questão do sequestro de carbono, foi feita uma análise elementar, CHN, que demonstrou que independente da idade, o bambu armazena cerca de 45% de carbono em sua biomassa. Esta quantificação é muito semelhante com a quantidade de carbono armazenada tanto pelo pinus como pelo eucalipto, espécies também de rápido crescimento e consideradas sequestradoras de carbono. Porém quando estes dados são analisados juntamente com as taxas de crescimento das plantas e com a produtividade anual, pode-se perceber a enorme vantagem que o bambu leva em relação às outras plantas para fazer o armazenamento de carbono.

Outra potencialidade do bambu abordada por este trabalho foi quanto à fabricação de um compósito de bambu com polímero, neste caso o PEBD. Os resultados demonstraram que o bambu e o PEBD possuem pouca adesão interfacial sendo incompatíveis na formação de um compósito, apresentando uma diminuição nas propriedades mecânicas. Porém com adição de um compatibilizante (PE-g-AM), ocorreu uma maior interação entre a matriz e a carga, aumentando o alongamento de ruptura.

Na análise comparativa entre o bambu e o aço e foram discutidas as vantagens do uso do bambu em substituição ao aço de construção. Os dados obtidos da literatura compilados foram convertidos em uma só unidade de medida e foi extraído um gráfico onde se podem perceber claramente as vantagens do bambu em substituição ao aço de construção.

Como pôde ser observado, o bambu possui excelentes características químicas e físicas, rápido crescimento, fácil cultivo e manejo, baixo custo. Pode ser amplamente explorado na substituição de outros materiais, como a madeira e o aço na construção civil, e também como reforço a outros materiais, como no caso dos polímeros, quando explorada a fibra do bambu. Pode também ser usado em substituição à madeira em móveis e artefatos, armazenando o carbono e contribuindo com a diminuição dos problemas ambientais.

O bambu ainda pode ser explorado no campo da engenharia e da química, desenvolvendo pesquisas a respeito de sua forma lamelar de carbono, como citado anteriormente, além da exploração de sua forma tubular de fibras que poderia ser usada como uma espécie de fôrma para fabricação de microfilamentos de outros materiais.

Capítulo 7

Sugestões para trabalhos futuros

O bambu se apresenta como um material possuidor de ricas propriedades ainda pouco exploradas, o campo de estudos é bastante amplo e abrangente. Este trabalho pode ser visto como um ensaio que comprova de forma preliminar as inúmeras vantagens do uso do bambu e deixa um campo aberto para futuros estudos de forma aprofundada.

Tendo como base os resultados obtidos e os aspectos observados durante essa pesquisa sugerem-se:

- Ampliar os estudos do bambu como fibra de reforço para compósitos com polímeros, testando outras matrizes e compatibilizantes.

- Explorar e ampliar os estudos relacionados à forma lamelar apresentada pelo bambu, assim como suas possíveis aplicações.

- Aprofundar os estudos em relação ao uso do bambu em substituição ao aço, estudando o ciclo de vida destes materiais, assim como se pode estudar o ciclo de vida da madeira para fabricação de móveis e artefatos e compará-los com o ciclo de vida do bambu.

- Estudos sobre a fabricação de produtos em escala industrial podem contribuir para um maior incentivo ao uso deste material.

Referências Bibliográficas

1. RIBAS, R. P. **Bambu: Planta de Grande Potencial no Desenvolvimento Sustentável.** Disponível em: < http://www3.mg.senac.br/NR/rdonlyres/ebct4snas56ztfg4uufdapm2vk7fmedw5tdeoexhuj2k5v77xsp7xt6xu7glaxgju6xxmoub3ihqbl/Rodrigo%2BPinheiro%2BRibas%252e8.pdf>. Acesso em: Jan. 2009

2. PEREIRA, M. A. R.; BERALDO, A. L. **Bambu de Corpo e Alma**. Bauru, SP: Canal6, 2007.

3. GAION, C. P.; PASCHOARELLI, L. C.; PEREIRA, M. A. R. **O Bambu como Matéria Prima para o Desenho Industrial: um estudo de caso.** In: 3º Congresso Internacional de Pesquisa em Design. Rio de Janeiro. 2005.

4. LONDONO, X. **Evaluation of Bamboo Resources in Latin America**. A Summary of the Final Report of Project N 96-8300-01-4. International Network for Bamboo and Rattan, 1999.

5. GRUPO INDUSTRIAL JOÃO SANTOS. **Bambu, do plantio à colheita – Manual do fazendeiro florestal.** SINDIFLORA. p. 1-33, 2000

6. GHAVAMI, K. **A volta do velho e forte bambu**. Revista Globo Ciência. 1995.

7. CASAGRANDE JR., E. F.; UMEZAWA, H. A.; TAKEDA, J. **Arranjo Produtivo Local Sustentável: Estudo de caso para o uso do potencial do bambu na geração de emprego e renda no Paraná.** XXIII Encontro Nac. de Eng. de Produção - Ouro Preto, MG, Brasil, 21 a 24 de out de 2003.

8. MANZINI, E. **Sustainability: Systemic Change and Social Learning Process.** INDACO – Politecnico di Milano, 2007.

9. BONSIEPE, G. **A "tecnologia" da Tecnologia**. São Paulo: Editora Edgard Blücher Ltda. 1983. 196p.

10. GRUPO BAMBU BRASIL. Disponível em: <http://www.bambubrasileiro.com/>. Acesso em Fev. 2010.

11. BAMCRUS. Disponível em: <http://www.bamcrus.com.br/index_principal.htm>. Acesso em Ago. 2009.

12. CNPQ. Disponível em: <http://www.cnpq.br/editais/ct/2008/025.htm>. Acesso em: Dez. 2008.

13. BISWAS, S.; SATAPATHY, A. **A comparative study on erosion characteristics of red mud filled bamboo–epoxy and glass–epoxy composites**. **Materials & Design**, Volume 31, Issue 4, April 2010, Pages 1752-1767

14. RAO, M. M.; RAO, K. M.; PRASAD, A.V. R. **Fabrication and testing of natural fibre composites: Vakka, sisal, bamboo and bananaMaterials & Design**, Volume 31, Issue 1, January 2010, Pages 508-513K.

15. LIU, D.; ZOHONG, T.; CHANG, P. R.; LI, K.; WU, Q. **Starch composites reinforced by bamboo cellulosic crystals.** Bioresource Technology 101 (2010) 2529–2536.

16. AMÉRICO, L. **Eco-Design e a utilização de materiais alternativos renováveis: o Bambu e sua inter-relação com o design.** Anais do 2° Simpósio Brasileiro de Design Sustentável (II SBDS), Rede Brasil de Design Sustentável – RBDS, São Paulo, 2009.

17. PENSANDO VERDE. Disponível em:< http://pensandoverde.blogtv.uol.com.br/2009/ 01/09/rede-social-do-bambu-reune-interessados-pela-planta-como-alternativa-sustentavel>. Acesso em Mar.2010.

18. PROTOCOLO DE QUIOTO. Disponível em:<HTTP://www.onu-brasil.org.br/doc_ quioto.php>. Acesso em Mar.2010.

19. ARTIGOS UNICAMP. Disponível em <http://www.labjor.unicamp.br/midiaciencia/ article.php3?id_article=679> Acesso em Dez. 2009.

20. DURIGAN, G. **Estimativas de Estoque de Carbono na Vegetação Natural do Estado de São Paulo.** Estudos da Secretaria do Meio Ambiente do Estado de São Paulo, 2004.

21. GORGENS, E. B.; OLIVEIRA, M. L. R.; LEITE, H. G.; NETO**,** Manoel da Silveira Brum, **Metodologia para Monitoramento de Estoque de Carbono: Revisão e Estudo de Caso.** Biomassa e Energia, v. 2, n. 2, p. 169-175, 2005.

22. HUNTER, I.R.; JUNQI, W. **Bamboo Biomass.** An INBAR Working Paper, S/D.

23. NETO, L. Ghelmandi; GIANNETTI, B.F. **Contabilidade dos Fluxos de CO2 em uma Pantação Comercial de Bambu Visando a Produção Papeleira.** Key Elements for a Sustainable World: Energy, Water and Climate Change, São Paulo, 2009.

24. BORGES, L.; FARIA, B. M.; ODEBRECHT, C.; ABREU, P. C. **Potencial de Absorção de Carbono por Espécies de Microalgas Usadas na Aqüicultura: Primeiros Passos para o Desenvolvimento de um "Mecanismo de Desenvolvimento Limpo".** Rio Grande, Atlântica, 29(1): 35-46, 2007.

25. OLIVEIRA, D.; PEREIRA, J. P.; RAMOS, A. L. M.; CARAMORI, P. H.; MARUR, C. J.; MORAIS, H.; WAGNER-RIDDLE, C.; VORONEY, P. **Carbono na biomassa e na respiração do solo em plantio comercial de seringueiras no Paraná.** In: Seqüestro de carbono: quantificação em seringais de cultivo e na vegetação natural. Alvarenga, A.P. e Carmo, C.A.F.S., editores. Viçosa, MG, p: 201-214. 2006.

26. HANSTEIN, S.; BEER, D.; FELLE, H. H. **Miniaturised carbon dioxide sensor designed for measurements within plant leaves.** Sensors and Actuators B, 81, p:107–114. 2001.

27. ALMEIDA, L. G. **Tecnologia de fibras, técnicas de fiação e tecelagem; controle de qualidade.** Disponível em: <http://www.institutodopv.orghttp://www.haco.com.br/br/s_ normas/s_tecidos.htmlWWW.portaisdamoda.com.br> Acesso em: Ago. 2010.

28. COUTO, G. M. **Utilização da Serragem de *Eucalyptus SP.* na Preparação de carvões ativados**. Dissertação de mestrado apresentada à Universidade Federal de Lavras. 106p. 2009.

29. BAMBUSC. Site da Associação Catarinense de Bambu. Disponível em: <http://bambusc. org.br/>. Acesso em: Out. 2010

30. LEE, S. H., WANG, S. **Biodegradable polymers/bamboo fiber biocomposite with bio-based coupling agent.** Composites: Part A, 80-91. 2005.

31. LOU, C.W., LIN, C.W., LEI, C.H., SU, K.H., HSU, C.H., LIU, Z.H., et al. **PET/PP blend with bamboo charcoal to produce functional composites.** J. Mater. Proc. Tech., 428–433. 2007.

32. MOHANTY, S.; NAYAK, S.K. **Short Bamboo Fiber-reinforced HDPE Composites: Influence of Fiber Content and Modification on Strength of the Composite.** Journal of REINFORCED PLASTICS AND COMPOSITES, Vol. 29, No. 14. 2010.

33. HUANG, X.; NETRAVALI, A. **Biodegradable green composites made using bamboo micro/nano-fibrils and chemically modified soy protein resin.** Composites Science and Technology. 69(7-8), 1009-1015. 2009.

34. WILZA G. R. L., **Solo-cimento Reforçado com Bambu: Características Físico-Mecânicas.** Tese de doutorado apresentada ao programa de pós graduação em engenharia agrícola da Universidade estadual de campinas. Campinas, 2002.

35. REDE SOCIAL DO BAMBU. Disponível em: <http://bamboo.ning.com/profiles/blogs /bambu-e-alternativa-para> Acesso em: Mar. 2010

36. OBERMANN, T.M.; **Bamboo Poles for Spatial and Light Structures.** Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellin - Technische Universität Berlin, Germany. Disponível em: <http://www.maderinsa.com/bamboo-space/documentacion_eng.pdf>. Acesso em: Jul. 2010.

37. GHAVAMI, K. **Bambu: um Material Alternativo na Engenharia.** São Paulo: Engenharia, 1992, (492): 23-27.

38. AGENDA 21 PARA A CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEL. Disponível em: <http://www.sustainablesettlement.co.za/docs/a21_discussiondoc.pdf>. Acesso em: Nov. 2010.

39. NETTO, L. G. **Avaliação da Carga e Custos Ambientais em uma Plantação Comercial de Bambu: Estudo de Alternativas de Produto Final e Substituição de Recursos.** Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia de Produção da Universidade Paulista – UNIP. São Paulo, 2009.

40. HIDALGO LOPEZ, O. **Bamboo the gift of the gods.** Bogotá. 2003, 553 p.

41. MERCEDES BENZ. Disponível em: <http://www.gbdiesel.com.br/noticias_detalhes.php?id=150>. Acesso em: Nov. 2010.

42. CEPEA – Centro de Estudos Avançados em Economia Aplicada – USP. Disponível em: <http://www.cepea.esalq.usp.br/>. Acesso em: Nov. 2010.

43. INBAMBU. Disponível em: <http://carlosmeloescultor.tripod.com/id10.html>. Acesso em: Nov. 2010.

Publicações do autor relacionadas com o trabalho

1. DELGADO, P. S., LANA, S. L. B., SOBREIRA, M. A. S. **Methods to quantify the rate of uptake by bamboo.** IX Encontro annual da Sociedade Brasileira de Pesquisa em Materiais (SPBMat). Ouro Preto – MG, 2010.

2. DELGADO, P. S., LANA, S. L. B., SOBREIRA, M. A. S. **O bambu e seu uso no design de produtos.** V Encuentro Latinoamericano de Diseño - DISEÑO EN PALERMO. Buenos Aires – Argentina, 2010.

3 - DELGADO, P. S.; LANA, S. L.; AYRES, E.; ORÉFICE, R. L. **The Potencial of Bamboo for the Design of Polymer Composites**. In. Materials Research. 2011. (Em processo de avaliação)