



Universidade de Brasília
Faculdade de Tecnologia
Departamento de Engenharia Florestal

**DESENVOLVIMENTO E CARACTERIZAÇÃO DE
PAINÉIS CONFECCIONADOS POR MEIO DA AUTO-
ADESÃO DAS FIBRAS DE COCO (*Cocos nucifera* L.)**

Alexandre Dídimo Sumizono Vieira

BRASÍLIA

MARÇO DE 2013



Universidade de Brasília
Faculdade de Tecnologia
Departamento de Engenharia Florestal

**DESENVOLVIMENTO E CARACTERIZAÇÃO DE PAINÉIS
CONFECCIONADOS POR MEIO DA AUTO-ADESÃO DAS FIBRAS
DE COCO (*Cocos nucifera* L.)**

ESTUDANTE: Alexandre Dídimo Sumizono Vieira

CPF: 026.411.291-16

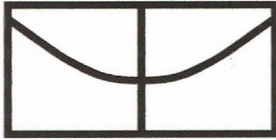
ORIENTADOR: Prof. Dr. Cláudio H. S. Del Menezzi

CO-ORIENTADOR: Dr. Mário Rabelo de Souza

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Departamento de Engenharia Florestal da Universidade de Brasília, como parte das exigências para obtenção do título de Engenheiro Florestal.

BRASÍLIA

MARÇO DE 2013



Universidade de Brasília
Faculdade de Tecnologia
Departamento de Engenharia Florestal

**DESENVOLVIMENTO E CARACTERIZAÇÃO DE PAINÉIS
CONFECCIONADOS POR MEIO DA AUTO-ADESÃO DAS FIBRAS
DE COCO (*Cocos nucifera* L.)**

ESTUDANTE: Alexandre Dídimo Sumizono Vieira

MATRÍCULA: 06/06731

MENÇÃO: SS

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. Cláudio H. S. Del Menezzi – UnB/FT/EFL (orientador)

Dr. Mário Rabelo de Souza – SFB/LPF/MMA (co-orientador)

Prof. Dr. Ailton Teixeira do Vale – UnB/FT/EFL

Brasília, 05 de março de 2013.

*Ao Soberano Criador,
Ao Senhor Jesus Cristo.*

AGRADECIMENTOS

À Santa Trindade pela oportunidade e privilégio de contemplar e agora compreender um pouco mais a criação.

Aos meus pais, Horácio e Sumire, e minha irmã, Ludmila, por toda a paciência, incentivo, compreensão e orações.

Ao prof. Cláudio H. S. Del Menezzi pela dedicação, confiança e paciência.

Ao Mário Rabelo pelo apoio e disposição, sem os quais a execução deste trabalho não seria possível.

Ao Sr. José de Barros e a toda a equipe da Coco Comandatuba (Una – BA) pelas fibras de coco.

Aos meus amigos pelos momentos de descontração, sinceridade e companhia, sem os quais não há amizade ou sanidade que se sustente.

Aos técnicos do Departamento de Engenharia Florestal Juraci Rodrigues de Sousa e Vanduí Francisco de Siqueira Dantas pelo auxílio e presteza.

Aos membros da secretaria de graduação do Departamento de Engenharia Florestal pelos serviços prestados por todos esses anos.

Aos funcionários do LPF Divino Teixeira, João Evangelista Anacleto, Antônio Carlos “Greg” R. de Carvalho e Luiz Domiciano “Lula” Santana pelo auxílio e acompanhamento.

Aos funcionários da Plataforma de Energia da Biomassa do LPF Alessandro C. de Oliveira Moreira e Paulo Fontes pela presteza e atenção.

Ao CNPq e o Programa de Iniciação Científica (ProIC) pela oportunidade e confiança.

“ORDEM E PROGRESSO”

RESUMO

O coco é um dos frutos com maior distribuição geográfica e em tempos mais recentes tem sido produzido em grande escala. Como somente 20% da massa desses frutos são efetivamente consumidos, a comercialização deste fruto desdobra numa elevada produção de resíduos, ainda mais considerando a sua produtividade que somente no ano de 2008 foi de 60,7 milhões de toneladas. Portanto, o objetivo deste trabalho foi produzir compósitos a partir de fibras de coco disponíveis no mercado por meio da sua auto-adesão e comparar os efeitos de dois tratamentos de umidade de partículas. As fibras de coco foram processadas em picador agrícola com peneira de 8mm de diâmetro e, posteriormente, tiveram os seus diâmetros e comprimentos medidos. Os colchões foram montados a partir de uma massa de 1,3 kg de partículas e foram prensados a quente até que a temperatura interna do painel atingisse 190 °C. O aumento da umidade aumentou a compressibilidade das partículas, surgindo a necessidade de se alterar a pressão específica de um tratamento para o outro (3,9 para 4,4 MPa). Conseqüentemente, os tratamentos produziram painéis cujas características físicas e mecânicas são estatisticamente distintas pelo teste da ANOVA (sig. < 0,001; $\alpha = 0,01$) tanto para as metodologias convencionais de ensaio quanto para o método de avaliação não-destrutiva de ondas de tensão (*Stress Wave*). De modo geral as propriedades físicas e mecânicas de T₂₀ foram superiores às de T₁₀. Apesar dos resultados de resistência e rigidez em flexão estática, inchamento (I) e absorção de água (A) não terem atendido aos requisitos da NBR 14.810 (2002), o material e a metodologia de prensagem são promissores. Considerando os valores de correlação entre essas variáveis, foram desenvolvidos modelos de regressão linear para determinar os Módulos de Ruptura (f_m) e de Elasticidade (E_M) e Ligação Interna (LI) tendo por base a velocidade de propagação de ondas (v_0) e o Módulo de Elasticidade Dinâmico (E_d), estes últimos determinados pela metodologia não destrutiva de ondas de tensão. Também foi determinada a Carga de Incêndio Específica (q_{fi}) dos painéis, sendo esta informação utilizada na segurança contra incêndios, aqueles pertencentes a T₁₀ apresentaram q_{fi} de 196,46 MJ/m² e T₂₀ de 228,50 MJ/m².

PALAVRAS-CHAVE: fibra de coco, auto-adesão, compósitos, *stress wave*, flexão estática, carga de incêndio específica.

ABSTRACT

Coconut is one of the tropical fruits which has a vast geographical distribution and it is currently being produced at large scales. Since only 20 % of the coconut mass is actually consumed, the waste development is enormous, especially considering the 2008 worldwide production yield of 60.7 million metric tonnes. Therefore, the objective of this study was to develop a binderless composite with coconut husk available at the Brazilian market and compare the effects of two particle humidity treatments. The mats were formed using 1.3 kg of particles and were hot-pressed until the panels' inner temperature reached 190 °C. The additional humidity enhanced particle compressibility, which made necessary a specific panel pressure change from 3.9 to 4.4 MPa from one treatment to the other. Consequentially, each treatment developed specific physical and mechanical fibreboard properties, that are statistically different from one another according to the ANOVA test (sig. < 0.001 @ $\alpha = 0.01$) for both the conventional evaluating methods and the non-destructive methodology of stress-waves. The overall results show that the increased humidity treatment (T_{20}) presented better physical and mechanical than the other treatment (T_{10}). Although the resistance and stiffness at flexural strength, thickness swelling (I) and water absorption (A) did not meet the Brazilian standard NBR 14,810 (2002) for particleboards, the composite material and pressing technique are promising. Based on the correlation values between the stress-wave velocity (v_0), dynamic module of elasticity (E_d), module of rupture (f_m), module of elasticity (E_M) and internal bonding (LI); mathematical models derived from linear regression analysis were developed, intending to estimate f_m , E_M and LI from v_0 and E_d . Taking into consideration the tragic event that occurred at Santa Maria (Santa Catarina state, Brazil) in January this year, it was also determined the panels specific fire load (q_{fi}), a fire management and fire safety information, T_{10} presented a value of 196.46 MJ/m² and T_{20} of 228,50 MJ/m².

KEYWORDS: coconut coir, self-bonding, composites, stress wave, static bending, specific fire load.

SUMÁRIO

1	Introdução	9
2	Hipótese.....	12
3	Objetivos	13
4	Revisão da Literatura	14
4.1	O Coco Verde (<i>Cocos nucifera</i> L.)	14
4.1.1	<i>Descrição Botânica</i>	15
4.1.2	<i>Caracterização do Mesocarpo</i>	16
4.1.2.1	Anatomia	16
4.1.2.2	Propriedades Físicas e Mecânicas das Fibras de Coco.....	21
4.1.2.3	Composição Química das Fibras de Coco.....	23
4.2	Confecção de Painéis por Auto-Adesão.....	25
4.2.1	<i>Preâmbulo Teórico</i>	25
4.2.2	<i>O Processo da Auto-Adesão</i>	25
4.2.3	<i>Referencial Teórico</i>	28
5	Metodologia	30
5.1	Obtenção e Processamento das Fibras.....	30
5.2	Caracterização das Partículas de Coco.....	30
5.2.1	<i>Comprimento e Espessura</i>	30
5.2.2	<i>Determinação da Umidade das Partículas</i>	30
5.3	Confecção dos Painéis.....	31
5.3.1	<i>Tratamentos</i>	31
5.3.2	<i>Caracterização Físico-Mecânica dos Painéis</i>	32
5.3.3	<i>Determinação do Poder Calorífico Superior (PCS) e Carga de Incêndio específica (q_{fi})</i>	35
5.3.4	<i>Confecção dos Corpos de Prova</i>	38
5.4	Análise de Dados.....	39
6	Resultados e Discussão	41
6.1	Caracterização e Processamento das Fibras em Partículas.....	41
6.2	Confecção dos Painéis.....	44
6.3	Caracterização Físico-Mecânica dos Compósitos	47
6.3.1	<i>Características Físicas</i>	48
6.3.2	<i>Propriedades Mecânicas</i>	49
6.3.3	<i>Modelos Matemáticos para Estimação de Propriedades Mecânicas</i>	54

6.3.4	<i>Propriedades Físicas</i>	54
6.3.4.1	Poder Calorífico Superior (PCS) e Carga de Incêndio Específica (q_{fi}) dos Painéis	56
7	Conclusão.....	59
8	Recomendações:.....	60
9	Referências Bibliográficas	61
10	Anexos.....	66
10.1	Análises Estatísticas e Dados Complementares	66

LISTA DE FIGURAS

<p>FIGURA 1 – Expansão da cocoicultura no Brasil entre 1990 e 2010. (MARTINS & JÚNIOR, 2011)</p> <p>FIGURA 2 – Produção dos 20 principais países produtores de coco. (FAO Stat, 2011).....</p> <p>FIGURA 3– Morfologia básica do coco em secção longitudinal. (van Dam, 2004b - adaptado)</p> <p>FIGURA 4 – Fotografias por microscopia eletrônica das fibras da variedade oriunda de <i>Rennel Island Tall</i> doadas pelo Centro de Pesquisa Zamboanga, pertencente à Autoridade Filipina em Coco. (A) Superfície do mesocarpo. (B) Parede celular ultrafina do tecido de bagaço. (C) Fratura criogênica superficial da fibra de coco.(van Dam et al., 2004b).....</p> <p>FIGURA 5 – Fotografias de cortes histológicos em secção transversal de diferentes fibras de coco. A) Abdul Khalil et al.(2006): <i>I e II</i>) Fibra multicelular constituída por diversas fibras [F] e presença de Lacuna [L]; <i>III e IV</i>) Elevado desenvolvimento da parede celular e espessas camadas S1, S2 e S3; Lamela Média [ML]. B) Munawar et al. (2006) A: variedade da Indonésia. C) Tomczak et al. (2007): variedade produzida no Nordeste brasileiro</p> <p>FIGURA 6 – Fotografias por microscopia eletrônica das fibras da variedade oriunda de <i>Rennel Island Tall</i> doadas pelo Centro de Pesquisa Zamboanga, pertencente à Autoridade Filipina em Coco. (A) Fibra com remanescente de células parenquimatosas do bagaço do mesocarpo. (B) Parede celular ultrafina e pontoações do tecido de bagaço. (C) Pontoações superficiais nas fibras de coco. (D) Estrutura helicoidal das microfibrilas constituintes da parede celular das fibras. (VAN DAM et al., 2006).....</p> <p>FIGURA 7 – Imagens das superfícies das fibras de coco: A) <i>in natura</i> B) tratada com água quente C) tratada com NaOH 5 %. (FERRAZ et al., 2011)</p> <p>FIGURA 8 – Curvas de Tensão x Deformação para fibras de coco. (A) Variedade Anjengo apresentado em van Dam et al. (2006, modificada). (B) Variedade coco anão apresentado em Esmeraldo (2010, modificada), com três tratamentos</p> <p>FIGURA 9 – Curvas de Resistência a Tração (<i>Tensile Strenght</i> ou <i>Ultimate Tesile Strenght</i>) em função dos diâmetros das fibras (<i>Diameter</i>). A) Fibra de coco Indiana (FAKIROV & BHATTACHARYYA, 2007); B) Fibra de coco produzida no Nordeste brasileiro (TOMCZAK et al. 2007)</p> <p>FIGURA 10 – <i>ESQUERDA</i>: Ilustração dos procedimentos adotados por van Dam et al. (2004a) para a produção de chapas de fibra coco. No sentido horário: cocos verdes; mesocarpo separado da semente; mesocarpo triturado em picador agrícola; painel de fibra de coco. <i>DIREITA</i>: Exemplos de compósitos 3D confeccionados a partir de fibras de coco (van Dam et al., 2004a).....</p> <p>FIGURA 11 – Diagrama de esquadrejamento dos compósitos, preparação e notação dos corpos de prova para os ensaios físicos e mecânicos. Notação: n° - numeração do painel; $n^{\circ} + A,B,C,D,E$ – corpos de prova para ensaios de flexão estática; $n^{\circ} + A,B,C,D,E + I,II$ – corpos de prova para ensaios de tração perpendicular, inchamento e absorção de água.....</p>	<p>15</p> <p>15</p> <p>16</p> <p>17</p> <p>18</p> <p>19</p> <p>21</p> <p>21</p> <p>22</p> <p>29</p> <p>39</p>
---	---

FIGURA 12 – Impurezas e contaminantes encontrados em meio às fibras: A) pedaços de carvão e inseto; B) algodão e fragmentos de rocha; C) pedaços de endocarpo; D) fibras claras e escuras; E) cascas de árvores; F) pedaços de inflorescências; G) tiras de tecido e plástico; H) folha e pedaços de embalagem; I) restos de herbáceas; J) terra; K) torrões de fibras e barro. Quadrados menores (1cm x 1cm); Quadrados Maiores (5cm x 5cm).....	42
FIGURA 13 – Histograma e Curva de Frequência Acumulada para os valores de Diâmetro das partículas em classes de 0,1mm	43
FIGURA 14 – Histograma e Curva de Frequência Acumulada para os valores de Comprimento das partículas em classes de 10mm	43
FIGURA 15 – Determinação da umidade de equilíbrio das partículas em aparelho Gehaka IV 3000	44
FIGURA 16 – <i>Esquerda:</i> colchão de partículas recém-tirado do molde; <i>Direita:</i> painel recém-prensado	44
FIGURA 17 – <i>Esquerda:</i> face superior dos painéis; <i>Direita:</i> face inferior dos painéis.....	45
FIGURA 18 – Curvas de aquecimento durante a prensagem para os tratamentos T_{10} e T_{20}	46
FIGURA 19 – Curvas de Carregamento e Deformação para os ensaios de Ligação Interna (LI) de T_{10}	50
FIGURA 20 – Curvas de Carregamento e Deformação para os ensaios de Ligação Interna (LI) de T_{20}	51
FIGURA 21 – Curvas de Tensão e Deformação. A) ensaios de flexão estática deste trabalho; B) Padrões de curvas previstas pela ASTM 790-03.....	48
FIGURA 22 – Desprendimento de extrativos durante (Esquerda) e após realização (Direita) dos ensaios de Inchamento e Absorção de água.....	56

EM ANEXO:

FIGURA A – Caixa e Bigode das características dos painéis produzidos pelos tratamentos T10 e T20 para as variáveis de Espessura, Densidade aparente (Dens.), Módulo de Elasticidade (E_m), Módulo de Ruptura (f_m), Módulo de Elasticidade Dinâmico (E_d) e Ligação Interna (LI)	70
---	----

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – Comparação entre dimensões das fibras observadas para VAN DAM et al. (2006) e RAMPAZZO (2011)	20
TABELA 2 – Alterações provocadas termicamente na madeira seca em atmosfera inerte [Schaffer (1973, APUD: FIGUEROA, 2009), resumido].....	27
TABELA 3 – Medidas descritivas dos Comprimento e Diâmetro das partículas.....	37
TABELA 4 – Estatística descritiva para cada tratamento referente aos valores de Densidade aparente (ρ_a), Módulo de Elasticidade (E_M), Módulo de Ruptura (f_m), velocidade medida pelo <i>Stress Wave</i> (v_0) e Módulo de Elasticidade Dinâmica (E_d)	47
TABELA 5 – Correlação de Pearson entre os valores encontrados separados por tratamento para Densidade aparente (ρ_a), Módulo de Elasticidade (E_M), Módulo de Ruptura (f_m), velocidade medida pelo <i>Stress Wave</i> (v_0) e Módulo de Elasticidade Dinâmico (E_d).....	48
TABELA 6 – ANOVA ($\alpha = 0,05$) para comparação dos dados de densidade entre os tratamentos.....	49
TABELA 7 – Valores para os Módulos de Ruptura (MOR) para os procedimentos de cálculo da ASTM 790-03 e o f_m	52
TABELA 8 – Modelos matemáticos estatisticamente significativos desenvolvidos a partir de análises de regressão ($Y = a + bx$) para determinação do Módulo de Elasticidade (E_M) e de Ruptura (f_m) e Ligação Interna (LI) através da velocidade de propagação de ondas (v_0) e Módulo de Elasticidade Dinâmico (E_d).....	54
TABELA 9 – Valores médios percentuais de Inchamento (I) e Absorção (A) de após 2 e 24h de imersão em água	55
TABELA 10 – Teste da ANOVA ($\alpha = 0,05$) para os valores de Espessuras (Esp.) observados nos tratamentos T_{10} e T_{20}	56
TABELA 11 – Valores de Poder Calorífico Superior (PCS)	57
TABELA 12 – Valores de Carga de Incêndio (q_{fi}) calculados a partir dos valores de Poder Calorífico Útil a 12% de umidade ($PC_{12\%}$), Densidade aparente (ρ_a) e Espessura (Esp.) dos painéis produzidos pelos tratamentos T_{10} e T_{20}	57
TABELA 13 – Classificação das Edificações e Áreas de Risco Quanto a Carga de Incêndio	58
 EM ANEXO:	
TABELA A – Teste da ANOVA ($\alpha = 0,01$) para os valores médios entre os tratamentos T_{10} e T_{20} para as propriedades de Densidade aparente (ρ_a), Módulo de Elasticidade (E_M), Módulo de Ruptura (f_m), velocidade de propagação de ondas (v_0) e Módulo de Elasticidade Dinâmico (E_d), Inchamento (I), Absorção de Água (A), Ligação Interna (LI) e ASTM 790-03 (σ_f).....	66

TABELA B – Teste de normalidade Shapiro-Wilk ($\alpha = 0,01$) para os valores observados de Densidade aparente (ρ_a), Módulo de Elasticidade (E_M), Módulo de Ruptura (f_m), velocidade de propagação de ondas (v_0) e Módulo de Elasticidade Dinâmico (E_d).....	67
TABELA D – Teste de normalidade Shapiro-Wilk ($\alpha = 0,05$) para os valores observados para as Espessuras (Esp.) nos tratamentos T_{10} e T_{20}	67
TABELA E – Teste t ($\alpha = 0,05$) para amostras emparelhadas dos valores de f_m (MPa) e σ_f (MPa) observados nos tratamentos T_{10} e T_{20}	67
TABELA F – Valores de Densidade aparente (ρ_a), Módulo de Elasticidade (E_M), Módulo de Ruptura (f_m), velocidade de propagação de ondas (v_0) e Módulo de Elasticidade Dinâmico (E_d), Inchamento (I), Absorção de Água (A), Ligação Interna (LI) e ASTM 790-03 (σ_f) para cada painel de cada tratamento	68

LISTA DE QUADROS

QUADRO 1 – Composição química das fibras de coco apresentado por Esmeraldo et al. (2010) referentes aos seus valores de α Celulose (α -Cellulose), Hemicelulose (<i>Hemicellulose</i>), Lignina (<i>Lignin</i>) de acordo com a sua Origem (<i>Origin</i>) e Referência (<i>Reference</i>).....	24
---	----

EM ANEXO:

QUADRO A – Ramo e folhas da distribuição dos diâmetros das partículas em classes de 0,1 mm.....	72
QUADRO B – Ramo e folhas da distribuição dos comprimentos das partículas em classes de 10 mm.....	72

1 Introdução

Na atualidade um dos temas mais recorrentes nos diferentes veículos de difusão de informações é a sustentabilidade dos meios de produção, embasados na escassez dos recursos naturais e na fragilidade do meio ambiente. Como um desdobramento dessa temática, há uma crescente demanda por produtos cujas etapas de produção sejam ambientalmente limpas ou que sejam, ao menos, de baixo impacto ambiental.

No setor florestal dentre os produtos mais comercializados estão as chapas de madeira, os compósitos de madeira e os fibrocimentos. Um aspecto comum a todos estes é a utilização de diferentes compostos químicos durante o seu processo de fabricação, cujas finalidades são de conferir ao produto melhores características físico-mecânicas. Isso ocorre na medida em que tensões são transferidas entre os componentes do painel através do adesivo sem que haja danos à estrutura do compósito.

Ao longo da história, semelhantemente aos demais produtos, a confecção de adesivos também sofreu grandes transformações e mudanças. Inicialmente advinham de diversos recursos naturais como ceras, pastas de amido e sangue. Já os adesivos sintéticos e modernos, como o fenol-formaldeído, que somente vem sendo utilizado desde o começo do Séc. XX (DETLEFSEN 2002, apud FRIHART 2005), além de serem produzidos com recursos escassos e não renováveis, também representam uma considerável porção dos custos de produção (WIDYORINI, 2005), podendo chegar a 30 % do total.

Nessa perspectiva, muitos estudos têm sido conduzidos em busca de novas técnicas que sejam capazes de produzir materiais que atendam às necessidades dos consumidores, sejam eficientes quanto ao uso de seus recursos e sejam ambientalmente sustentáveis, sem deixar de atender padrões técnicos. Dentre estas técnicas, estão as que permitem a auto-adesão de materiais. Dos Estados Unidos, Hunt e Supan (2006) apresentam que chapas de fibras dura confeccionadas a partir de fibras recicladas e galhadas de topos de pinheiros atenderam aos padrões técnicos do país sem a necessidade da adição de adesivos durante a sua confecção. Do Japão, Widyorini (2005) relata que as chapas confeccionadas a partir da porção fibrosa de *Miscanthus sinensis* (herbácea) apresentaram propriedades mecânicas superiores às chapas confeccionadas com o bagaço da *M. sinensis*; o estudo avaliou apenas as propriedades auto-adesivas dessa planta em diferentes métodos de confecção de chapas de fibras. Este último autor também conseguiu produzir chapas de fibras por auto-adesão para a espécie *Hibiscus cannabinus* L. (vulga *kenaf*) variando apenas a

metodologia de prensagem; além disso, o mesmo autor aponta que tais técnicas podem ser de grande valor para países emergentes cuja produção agrícola gere volumosas quantidades de resíduos de origem vegetal, lignocelulósicos.

No Brasil poucos estudos sobre tecnologias de produção de compósitos por auto-adesão foram realizados. Ferreira (2009) e Deus (2009) estudaram a possibilidade de se utilizar de finos de *Guadua magna* (bambu taquaraçú) como substituto do adesivo em chapas laminadas e ambas as autoras obtiveram êxito ao confeccionarem chapas de madeira compensadas de *Pinus oocarpa* e *Eucalyptus grandis*, respectivamente. Considerando o potencial do país relativo à sua capacidade de produção de resíduos, além da própria riqueza de florística, estudos como os mencionados se fazem relevantes considerando os novos paradigmas de produção.

A produtividade do agronegócio brasileiro não está dando sinais nem de estabilização nem de encolhimento. Muito pelo contrário, é de se esperar que venha a crescer ainda mais nos próximos anos, e a produção de resíduos de origem vegetal acompanhará esse crescimento, e dentre estes estarão os do coco verde.

Nesse contexto, um recurso promissor para a confecção de compósitos não madeiros é a fibra do coco verde (*Cocos nucifera* L.) cuja produção mundial em 2008 superou a marca de 60,7 milhões de toneladas (MARTINS; JÚNIOR, 2011). Considerando apenas a nação brasileira, os mais de 287 mil hectares destinados a cocoicultura (MARTINS; JÚNIOR, 2011) produzem atualmente cerca de 3,2 milhões de toneladas do fruto (FAO Stat, 2011). Rosa et al. (2001) relatam a ocorrência de restrições legais quanto à comercialização do coco verde em cidades litorâneas em função da elevada quantidade de resíduos produzidos, do acúmulo destes em lixões e em aterros sanitários.

De maneira genérica, uma das principais atribuições da Engenharia Florestal é o manejo adequado de recursos florestais quer silvestre, quer plantado; e apesar de a cocoicultura ser uma modalidade de produção em escala dentre as monoculturas, o recurso coqueiro, bem como os seus produtos e subprodutos, também podem ou devem ser manejados adequadamente.

Considerando as premissas apresentadas, este trabalho está fundamentado no princípio básico da gestão de qualidade, a qual envolve o uso racional de recursos visando a sua completa utilização de maneira ótima. No caso específico, as fibras presentes nos frutos do coqueiro. Aliado a isso, a auto-adesão é um processo, em cuja essência de execução, é dotada de uma razoável simplicidade. Então, numa perspectiva social, o desenvolvimento de mais um produto confeccionado com fibras de coco tem o potencial de servir

de auxílio no desenvolvimento das comunidades produtoras de coco verde à medida que um resíduo pode passar a se tornar um produto de valor agregado. Isto é, supondo que tanto a tecnologia seja transferida quanto os resíduos sejam processados ou retornados às comunidades produtoras.

2 Hipótese

A confecção de painéis lignocelulósicos sem o uso de adesivos é possível quando a capacidade auto-adesiva destes materiais é precisamente trabalhada.

3 Objetivos

Estudar e confeccionar chapas através da auto-adesão das fibras de coco. Especificamente, avaliar o(s) efeito(s) da umidade das fibras sobre as características e propriedades dos compósitos produzidos.

4 Revisão da Literatura

4.1 O Coco Verde (*Cocos nucifera* L.)

A principal referência quanto à origem do coqueiro é o Sudeste Asiático, onde também é apontado como centro da diversificação desta frutífera. Atualmente presente em mais de 200 países, a espécie *Cocos nucifera* L. pode ser encontrada em quase todos os continentes, provavelmente fazendo desta uma das culturas de maior difusão territorial. Porém a sua exploração comercial está restrita a 90 países, devido às condições de solo e clima mais favoráveis; sendo que a maior parte da produção ocorre em propriedades com até dez hectares (MARTINS; JÚNIOR, 2011). Joardder et al. (2011) atribuem às características silviculturais do coqueiro o motivo de sua grande difusão territorial, segundo os autores são árvores que praticamente dispensam cuidados, necessitando de temperaturas médias anuais superiores a 13 °C, precipitação média anual de pelo menos 1.000 mm e nenhum ou pouco sombreamento. Características facilmente observáveis em muitos países.

Estima-se que a produção mundial de coco para o ano de 1998 foi de 49 milhões de toneladas, em 2008 essa estimativa passou para 60,7 milhões de toneladas, um aumento de 11,7 milhões de toneladas, para a mesma área de 11,2 milhões de hectares espalhados por todo o globo. A participação nacional dentro desse cenário foi com uma produção de mais de 2,7 milhões de toneladas produzidas numa área estimada em 287.016 ha. cujo núcleo de difusão e produção está na Região Nordeste, porém o seu cultivo já alcançou quase que todas as unidades federativas até o ano de 2010 (Figura 1; MARTINS; JÚNIOR, 2011).

Atualmente os 20 principais países produtores do fruto somaram em 2011 uma produção superior a 57,9 milhões de toneladas segundo a *Food and Agriculture Organization of the United Nations* (FAO), conforme apresentado na Figura 2. E entre 2008 e 2011 a produção brasileira subiu de 2,7 para 3,2 milhões de toneladas (FAO Stat, 2011). Considerando as proporções de massa para cada tipo de tecido presente no coco, Rosa et al. (2001) apontam que 35 % da massa total de cada fruto são fibras, já Tomczak et al. (2007) afirmam que as fibras do mesocarpo (Figura 3) correspondem a 25 % da massa do fruto. Então, somente no Brasil, são produzidas aproximadamente entre 805 mil e 1,12 milhão toneladas de fibras de coco todo ano.

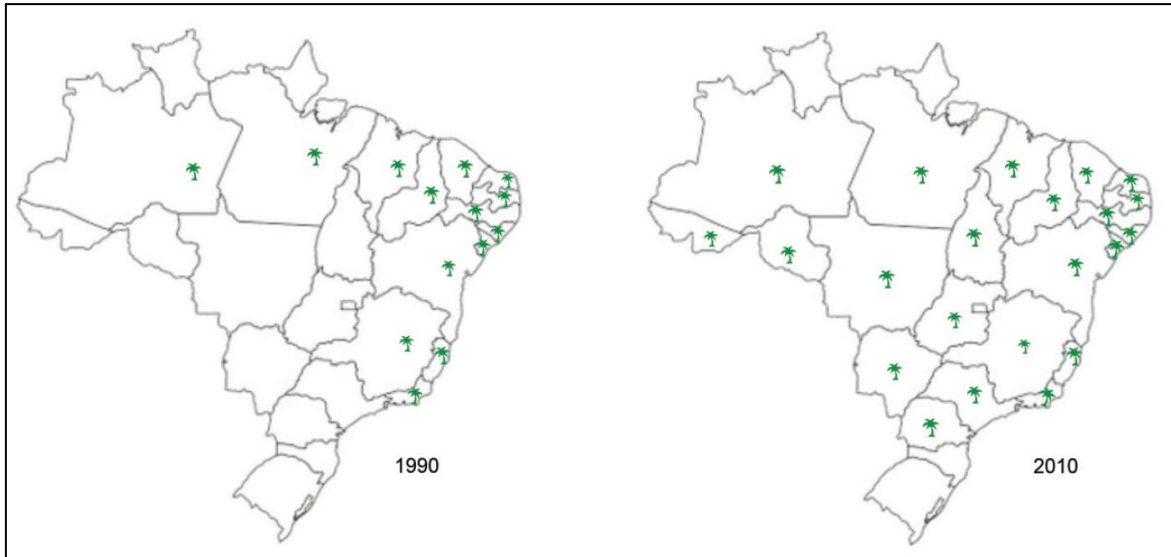


FIGURA 1 – Expansão da cocoicultura no Brasil entre 1990 e 2010. (MARTINS; JÚNIOR, 2011)

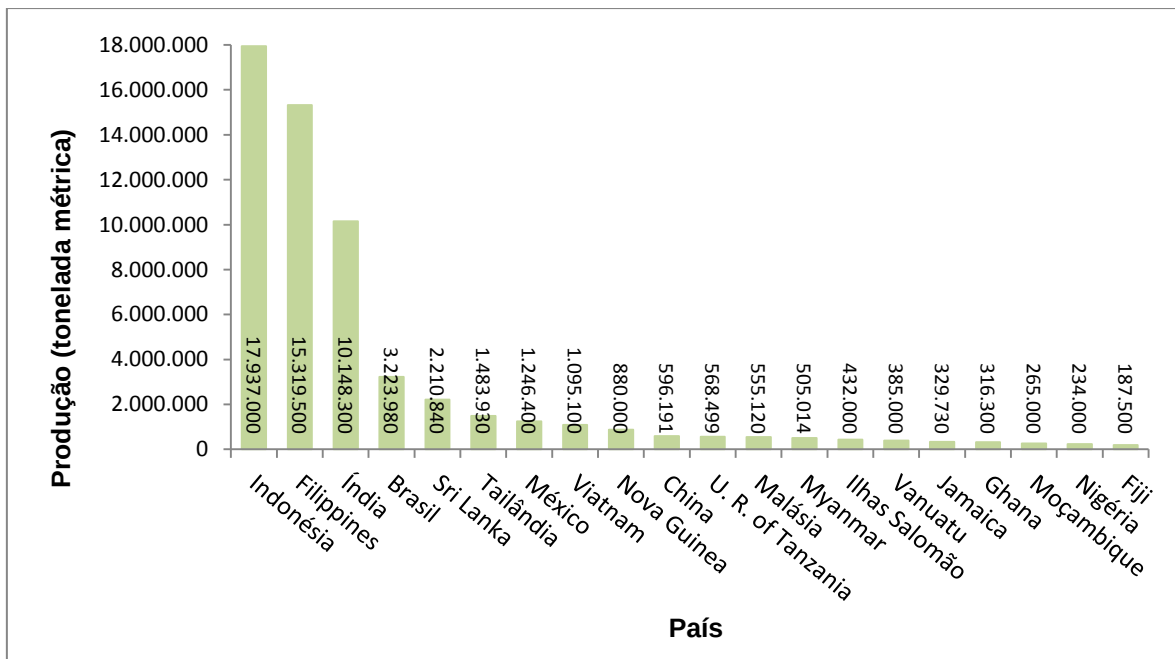


FIGURA 2 – Produção dos 20 principais países produtores de coco em 2011. (FAO Stat, 2011)

4.1.1 Descrição Botânica

Botanicamente a espécie *C. nucífera* pertence atualmente a Família *Palmae*, única dentro da Ordem *Principales*, cujos representantes são majoritariamente plantas lenhosas de portes arbóreos e arbustivos, raramente são trepadeiras (JOLY, 2002). Os frutos dessa espécie são secos do tipo drupa, simples, monocápicos, carnosos, indeiscentes e monos-

pérmicos, cujo pericarpo apresenta três camadas distintas, o epicarpo, mesocarpo e endocarpo mostrados na Figura 3 (VIDAL, 2003). Também conhecido como cocoqueiro-da-bahia, a espécie pode apresentar alturas entre 10 e 20 metros, excepcionalmente com estipe de 30 metros; diâmetros entre 20 e 30 centímetros; o número de folhas contemporâneas entre 20 e 25, cujos comprimentos estão entre dois e três metros (LORENZI, 2002).

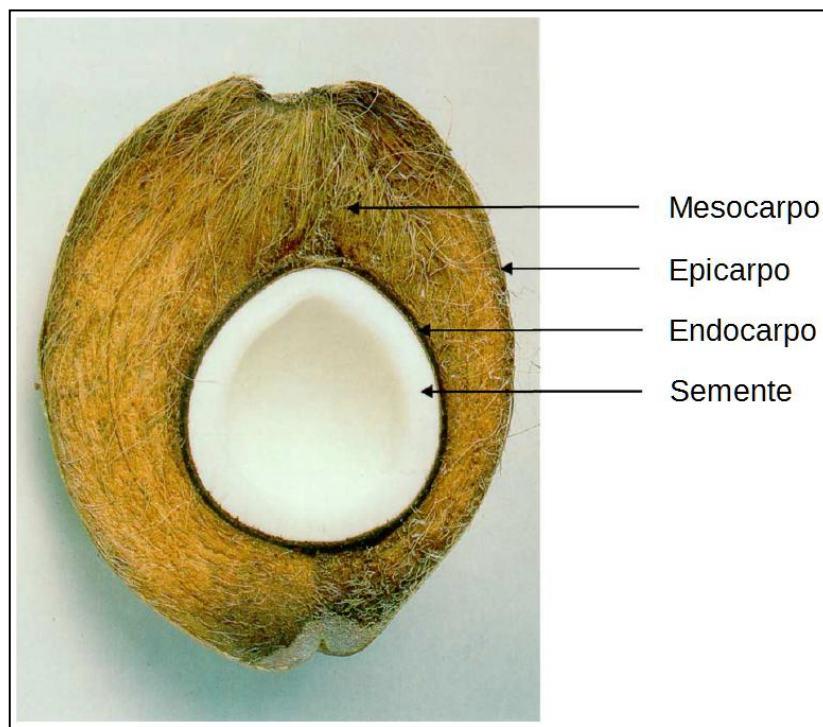


FIGURA 3—Morfologia básica do coco em secção longitudinal. (VAN DAM et al., 2004b; adaptado)

4.1.2 Caracterização do Mesocarpo

4.1.2.1 Anatomia

O mesocarpo do coco é constituído basicamente por fibras (Figura 4C) e bagaço (Figuras 4A), sendo o bagaço o conteúdo volumétrico predominante (VAN DAM *et al.*, 2004b). Van Dam et al. (2006) constataram que para as variedades estudadas houve uma amplitude considerável para a proporção fibra/bagaço, variando entre 0,28 e 0,60 quanto às respectivas massas.

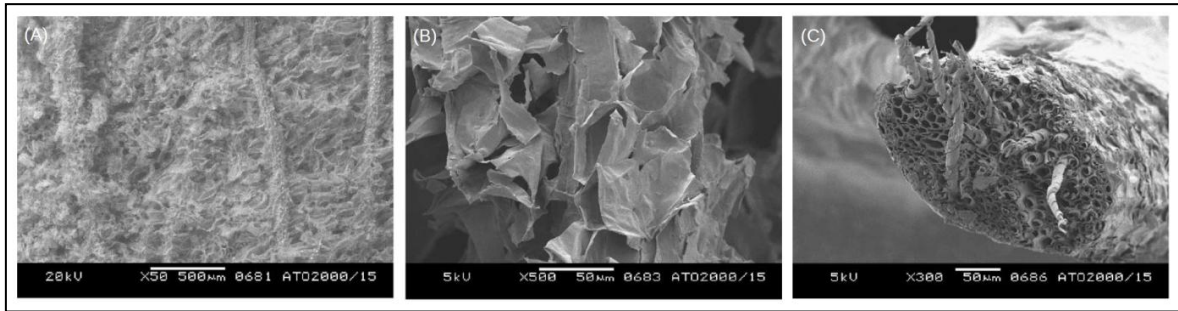


FIGURA 4 – Fotografias por microscopia eletrônica das fibras da variedade oriunda de *Remel Island Tall* doadas pelo Centro de Pesquisa Zamboanga, pertencente à Autoridade Filipina em Coco. (A) Superfície do mesocarpo. (B) Parede celular ultrafina do tecido de bagaço. (C) Fratura criogênica superficial da fibra de coco. (VAN DAM et al., 2004b)

Abdul Khalil et al. (2006) estudando uma variedade de coco da Malásia em cortes histológicos descrevem a fibra de coco palpável e visível a olho nu como sendo uma fibra multicelular, constituída por fibras, floema, células parenquimáticas e uma lacuna (Figura 5 AI e AII). Nota-se que as fibras estudadas por van Dam (2004b) (Figura 4C), Munawar et al.(2006) (Figura 5B) e Tomczak et al. (2007) (Figura 5C) não apresentam a lacuna descrita por Abdul Khalil et al. (2006). Ainda considerando este último, os autores estudando as fibras do coco, abacaxi e palmeira, relatam que as do coco apresentaram um espessamento da camada S_3 superior às demais (Figura 5 AIV). Em suma, as imagens de microscopia deixam claro que as fibras palpáveis e visíveis a olho nu são na realidade um feixe de fibras, isto é, considerando uma perspectiva anatômica.

Morfologicamente as fibras apresentam um formato oval (Figuras 4C e 5 AI) e são envolvidas por remanescentes residuais de células parenquimatosas constituintes do bagaço presente no mesocarpo (Figura 6A), algo que indica uma íntima adesão entre a fibra e o tecido esponjoso do bagaço. Essas células de parênquima têm uma espessura de parede celular de 0,1 a 0,5 μm e comprimento entre 30 e 60 μm , portanto um indicativo de uma baixa densidade e elevada compressibilidade (Figuras 4B e 6B). As fibras apresentam estrias longitudinais características as quais podem conter pontoações (Figura 6C), bem como fragmentos de células parenquimatosas (Figura 6A).

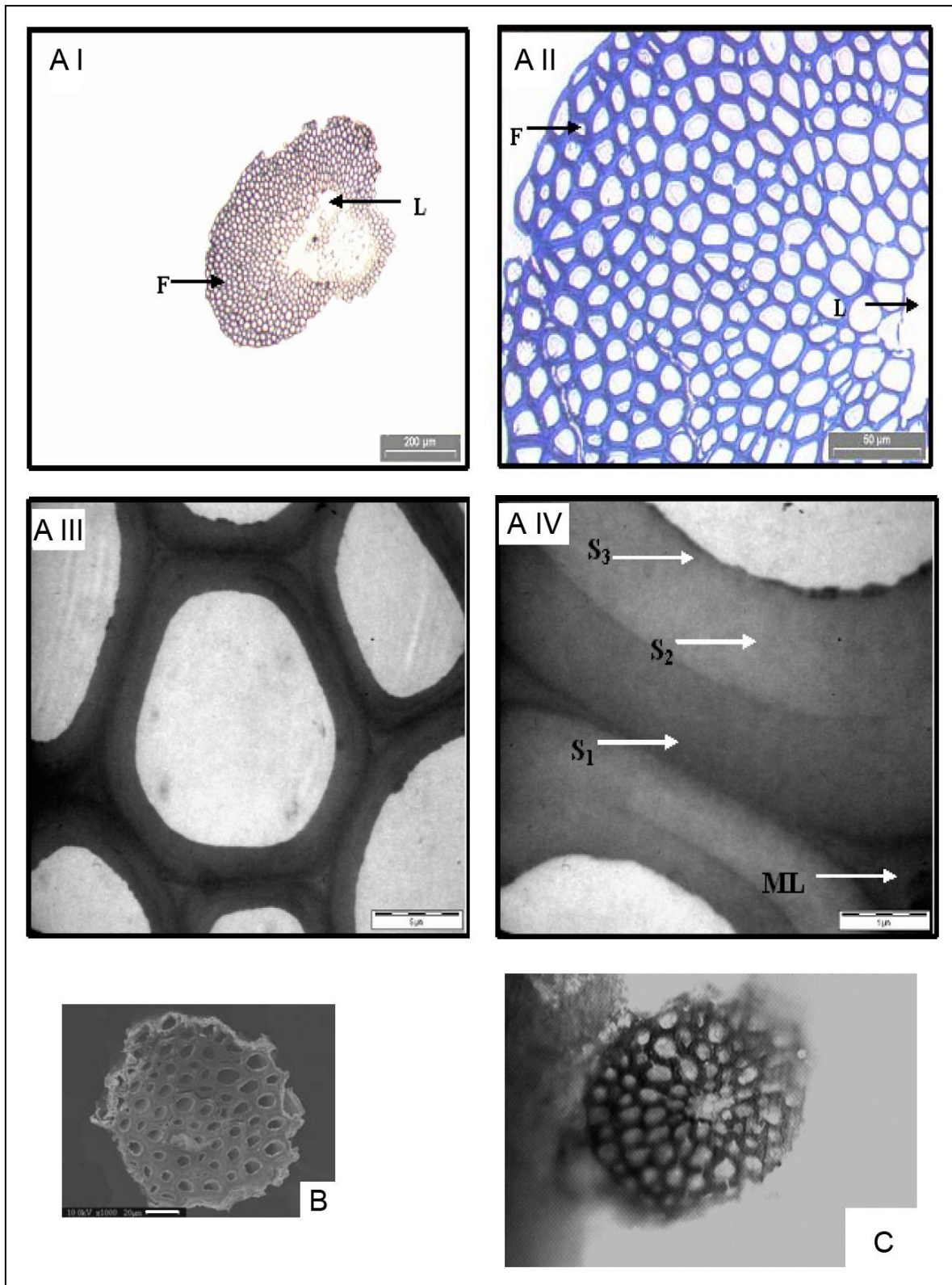


FIGURA 5 – Fotografias de cortes histológicos em secção transversal de diferentes fibras de coco. **A)** Abdul Khalil et al.(2006): *I e II* - Fibra multicelular constituída por diversas fibras [F] e presença de Lacuna [L]; *III e IV* - Elevado desenvolvimento da parede celular e espessas camadas S1, S2 e S3; Lamela Média [ML]. **B)** Munawar et al. (2006): variedade da Indonésia. **C)** Tomczak et al. (2007): variedade produzida no Nordeste brasileiro.

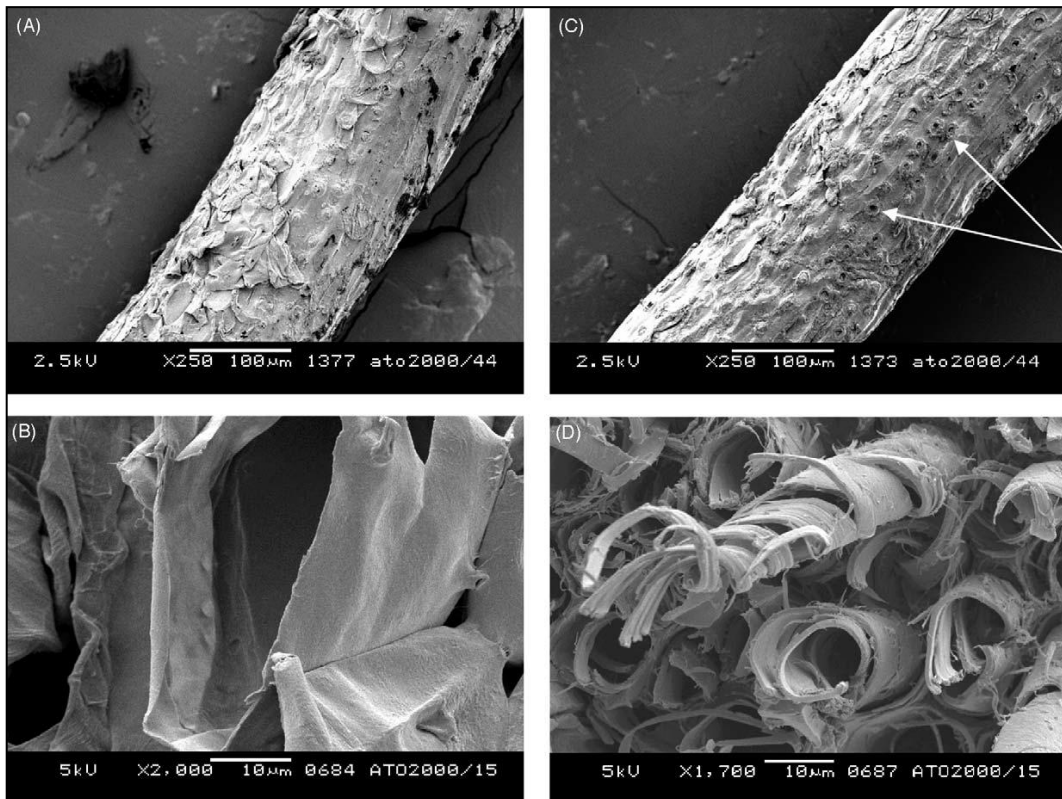


FIGURA 6 – Fotografias por microscopia eletrônica das fibras da variedade oriunda de *Rennel Island Tall* doadas pelo Centro de Pesquisa Zamboanga, pertencente à Autoridade Filipina em Coco. (A) Fibra com remanescente de células parenquimatosas do bagaço do mesocarpo. (B) Parede celular ultrafina e pontoações do tecido de bagaço. (C) Pontoações superficiais nas fibras de coco. (D) Estrutura helicoidal das microfibrilas constituintes da parede celular das fibras. (VAN DAM et al., 2006)

Considerando as dimensões das fibras do coco é possível notar que houve uma menor variação para as seis variedades filipinas de coco estudadas por van Dam et al. (2006) que para a única variedade brasileira estudada por Rampazzo (2011), conforme apresentado na Tabela 1. Isso sugere que algumas das fibras brasileiras podem apresentar uma menor “padronização anatômica”, algo que poderá influenciar as propriedades mecânicas dos painéis confeccionadas a partir destas. Ainda comparando os trabalhos destes autores, as densidades encontradas para as fibras foram próximas, $1,28 \pm 0,25 \text{ g/cm}^3$ para Rampazzo (2011) e $1,32 \pm 0,03 \text{ g/cm}^3$ para van Dam et al. (2006). Sendo que este último utilizou uma sétima variedade indiana (Anjengo), considerada superior, para a determinação da densidade das fibras. Além disso, este último também apresentam que a densidade média do mesocarpo foi de $0,15 (\pm 0,01) \text{ g/cm}^3$, corroborando com a evidência de que a fina espessura e o grande comprimento das células parenquimatosas do mesocarpo reduzem a densidade do mesocarpo como um todo, a qual foi estimada entre $0,11$ e $0,13 \text{ g/cm}^3$.

TABELA 1 – Comparação entre dimensões das fibras observadas para VAN DAM et al. (2006) e RAMPAZZO (2011).

AUTOR	Comprimento (mm)		Diâmetro (μm)		Diâmetro do Lúmen (μm)		Espessura da Parede (μm)	
	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.
VAN DAM et al. (2006)	0,69	1,06	17,52	20,68	11,70	14,23	2,91	4,02
RAMPAZZO (2011)	0,22	0,94	8,67	29,83	2,33	17,56	2,82	7,53

Van Dam et al. (2006) estudando seis diferentes variedades de fibras verdes observaram que a proporção de massa entre fibras longas ($> 12,7$ cm) e curtas variou entre 0,54 e 0,64, portanto uma proporção de praticamente 50 %. Já Aragão et al. (2004) relatam uma proporção entre 0,3 e 0,4 de fibras longas e entre 0,6 e 0,7 de fibras curtas e pó para o coco maduro (seco), evidências de alterações anatômicas em função do amadurecimento do fruto. De maneira geral, a espessura das fibras consideradas longas (220-870 μm) foi maior que para as fibras consideradas curtas (130-390 μm); e a partir da extração manual das fibras para a determinação dos diâmetros das fibras, a ampla variabilidade dentro de cada mesocarpo descartou a relevância da variação diamétrica das fibras entre as diferentes variedades de coco (VAN DAM et al., 2006).

No intuito de se melhorar as propriedades de resistência da fibra, a superfície das fibras pode ser quimicamente tratada e os resultados variam conforme a natureza da solução, conforme Ferraz et al. (2012) apresentam. No estudo destes, à semelhança do trabalho de van Dam (2006), foram obtidas imagens da superfície da fibra por meio de microscopia eletrônica de varredura. Ambos os autores caracterizam a fibra *in natura* como brilhosa (Figura 7A). Ferraz et al. (2012) descrevem a fibra tratada com solução aquosa de NaOH 5 % como opaca e corroída (Figura 7C), e a com água quente apresentava alguma aspereza ou rugosidade (Figura 7B). Essas diferenças ocorreram em função das reações entre as soluções e os açúcares e óleos residuais presentes nas fibras. Informações relevantes para este trabalho, pois a origem das fibras utilizadas por Ferraz et al. (2012) é a mesma, portanto, pode-se esperar que esses resíduos presentes nas fibras influenciarão nos resultados obtidos.

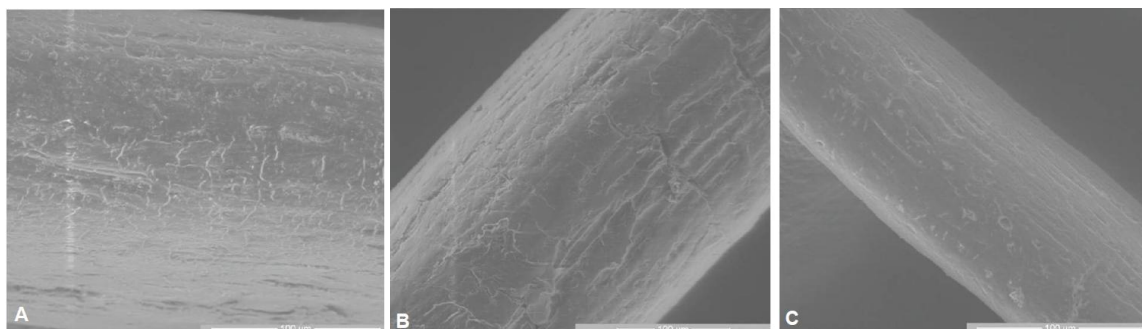


FIGURA 7 – Imagens das superfícies das fibras de coco: A) *in natura* B) tratada com água quente C) tratada com NaOH 5 %. (FERRAZ et al., 2011)

4.1.2.2 Propriedades Físicas e Mecânicas das Fibras de Coco

As fibras de coco são dotadas de resistência a ruptura e de elasticidade, ambas descritas por van Dam et al. (2006) e Esmeraldo et al. (2010). O primeiro observou uma resistência de aproximadamente 250 MPa “*pouco antes da fibra de Anjengo se romper*” e estiramento de aproximadamente 25 % do comprimento da fibra (Figura 8A). O segundo autor observou que concentrações superiores de NaOH nas soluções aquosas utilizadas no tratamento das fibras conferiram melhores características de resistência a ruptura e alongação de maneira diretamente proporcional. Vale ponderar que Esmeraldo et al. (2010) utilizaram fibras da variedade coco anão e o tratamento com 10 % de NaOH conferiu uma resistência mais que dobrada às fibras tratadas que as não tratadas (Figura 8B).

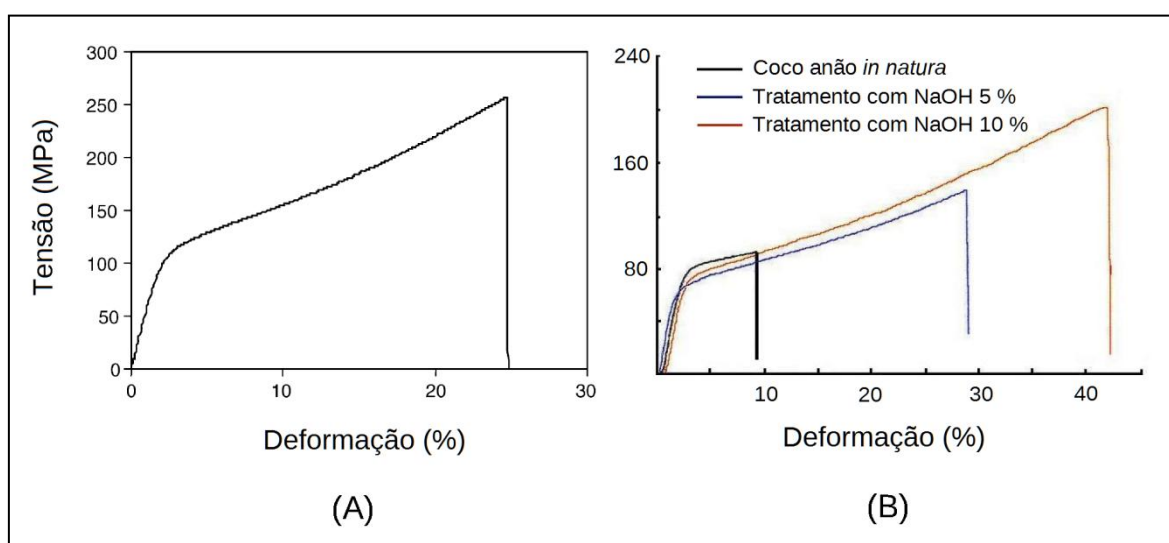


FIGURA 8 – Curvas de Tensão x Deformação para fibras de coco. (A) Variedade Anjengo apresentado em van Dam et al. (2006, modificada). (B) Variedade coco anão apresentado em Esmeraldo (2010, modificada), com três tratamentos.

De maneira geral é de se esperar que a capacidade de carga de um material seja diretamente proporcional às suas dimensões, porém isso não ocorre para a maioria das fibras de coco, exceção feita a algumas variedades indianas. Estas apresentam um aumento gradativo em sua capacidade de carga à medida que o diâmetro da fibra aumenta e alcançam um patamar praticamente constante (Figura 9A). Segundo a literatura, de maneira generalizada, quanto maiores o comprimento e o diâmetro menores são as resistências observáveis à tração. Portanto, as fibras de coco são materiais dúcteis, pois apresentam grandes estiramentos sob pequenas cargas. (FAKIROV; BHATTACHARYYA, 2007, TOMCZAK et al. 2007, VAN DAM et al. 2006)

O fenômeno descrito acima foi observado para as seis variedades estudadas por van Dam et al. (2006) cujas rupturas das fibras sob tração variaram de 90 a 105 MPa com alongamentos entre 28,3 e 40,3 % para as fibras longas (> 127 mm) enquanto que as fibras curtas apresentaram cargas de ruptura entre 95 e 152 MPa e alongamentos entre 20,05 e 27,3 %. No entanto esses valores foram cerca da metade dos avaliados em outros trabalhos, os autores apontam que isso pode ter ocorrido por conta do frescor dos frutos utilizados. Pois a umidade influi diretamente na capacidade de carga de materiais lignocelulósicos; a madeira, como se conhece, é mais resistente quando seca que quando úmida.

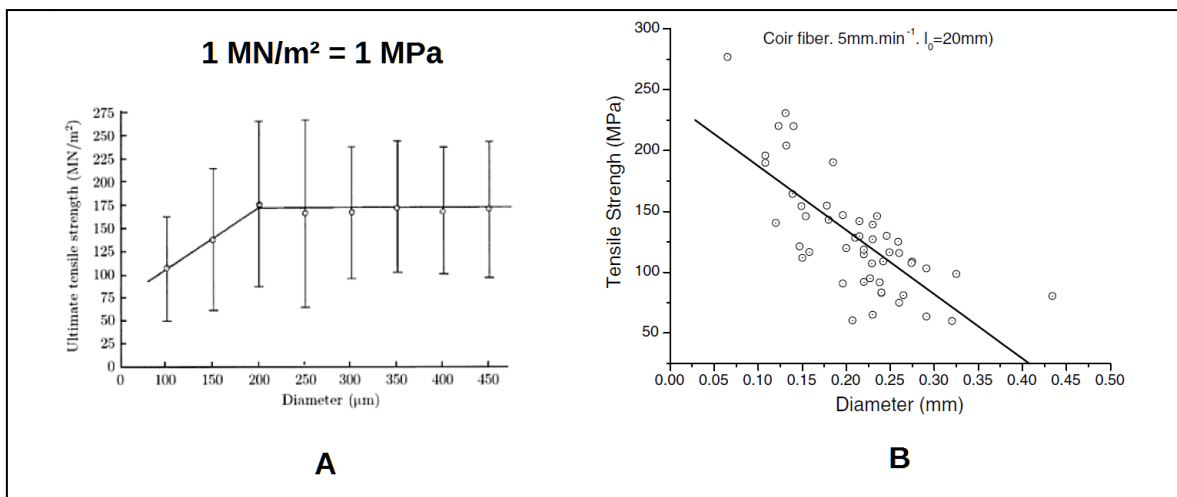


FIGURA 9 – Curvas de resistência à tração (*Tensile Strength* ou *Ultimate Tensile Strength*) em função do diâmetro das fibras (*Diameter*). A) Fibra de coco Indiana (FAKIROV; BHATTACHARYYA, 2007); B) Fibra de coco produzida no Nordeste brasileiro (TOMCZAK et al. 2007).

A ultraestrutura celular das fibras formada por microfibrilas helicoidais presentes na camada S₂ (Figura 6D) formam uma grã entre 36 ° e 45 ° em relação ao eixo principal da fibra, essa característica é a que confere a alta resiliência destas fibras (VAN DAM et al. 2006; RAHMAN et al. 2007). Já as fibras produzidas no Nordeste do Brasil, tanto em fun-

ção das melhorias genéticas como também devido ao período de colheita, apresentam um ângulo de 51 ° para as microfibrilas (TOMCZAK et al.,2007). Portanto é de se esperar um desempenho inferior destas em relação às demais.

4.1.2.3 Composição Química das Fibras de Coco

A composição química das fibras varia consideravelmente, principalmente quanto aos teores de lignina, composto muito relevante para a realização da auto-adesão. Esmeraldo et al. (2010) apresentam numa tabela as diferentes composições químicas encontradas por diferentes autores para fibras de coco de alguns dos principais produtores de coco no mundo (Quadro 1), como a Malásia, Filipinas, Sri Lanka e Índia; nesta os valores para o teor de lignina total nas fibras variam de 17,8 a 70 %. Em seu próprio trabalho esses autores encontraram uma variação entre 57 e 64 %. Noutros estudos brasileiros que estudaram as fibras verdes, Aragão et al. (2004) verificaram que essa variação esteve entre 35 e 45 %, Rampazzo (2011) observou um percentual de 32,7 ($\pm 1,2$) e Ferraz et al. (2012) de 34,24 %, sendo que as fibras deste último são do mesmo fornecedor deste trabalho.

Van Dam et al. (2006) estudando tanto as fibras quanto o bagaço, para as seis variedades, constataram que existe uma diferença na concentração de lignina entre ambos os componentes do mesocarpo do coco sendo de 33,6 a 36,6 % e 43,5 a 47,3 %, respectivamente. Então, a lignina presente no bagaço pode auxiliar na auto-adesão das fibras de coco. Van Dam et al. (2004b) observaram que a concentração de lignina aumenta com o amadurecimento do fruto tanto para as fibras como para o mesocarpo como um todo, sendo que os maiores percentuais podem ser observados em frutos com 11 meses de idade. Aragão et al. (2004) confirmam este aumento para as fibras provenientes de frutos maduros, os quais apresentarem um teor de lignina entre 41 e 46 %, enquanto os de sete e oito meses apresentam uma concentração entre 35 e 45 %.

O teor de α celulose varia entre 20 e 40 % para a maioria dos frutos, podendo haver situações excepcionais cujas concentrações são de até 64 %. O conteúdo de hemicelulose, semelhantemente ao de lignina, também apresenta uma ampla oscilação, desde 0,25 até 56,3 %, no entanto para a maioria das observações os valores estão entre 10 e 16 % (ESMERALDO et al., 2010; VAN DAM et al., 2004b).

Considerando o teor de holocelulose, que é a soma do teor de celulose e hemicelulose, Rampazzo (2011) observou um valor médio de 57,6 %, Ferraz et al. (2012) de 60,90 % e Munawar et al. (1998) observaram que o endocarpo apresenta uma concentração maior

(79,29 %) que o mesocarpo (56,45 %). Estes valores concordam com os resultados dos ensaios mecânicos realizados por van Dam et al.(2004a), apresentados mais adiante. Pois no seguimento de celulose e papel maiores teores de celulose e hemicelulose conferem ao papel melhores resistências.

QUADRO 1 – Composição química das fibras de coco apresentado por Esmeraldo et al. (2010) referentes aos seus valores de α Celulose (α -Cellulose), Hemicelulose (*Hemicellulose*), Lignina (*Lignin*) de acordo com a sua Origem (*Origin*) e Referência (*Reference*).

α -Cellulose	Hemicellulose	Lignin	Origin	Reference
36-43	----	41-45	India	Geethamma et al. (1998a)
43.4	0.25	45.8		Khedari et al. (2005)
46	21	31		Khalil et al. (2001)
47	15	31		Hill et al. (1998)
47.7	25.9	17.8		Raveendran et al. (1995)
64	-----	-----	India	Edwards et al. (1997)
----	-----	27.2-33.8		Kelley et al. (2004)
33.3-35.5	16.8-18	33.6-36.6	Philippines	Hill et al. (1998) ^(1,2)
36.3	-----	31.9 (AIL)	Philippines	Van Dam et al. (2004b) ⁽³⁾
		0.8 (ASL)	Philippines	Van Dam et al. (2004b) ⁽³⁾
53	-----	40.8		Savastano Jr et al. (1997a)
43.4±1.2	4.0±0.3	48.3±1.9	Brazil	Razera (2006) ⁽⁴⁾
45.1±0.8	5.0±0.7	44±1.0	Brazil	Razera (2006) ⁽⁵⁾
44.2	56.3 ⁽⁶⁾	32.8	Malaysia	Khalil et al. (2006)
20-30	7-9	65-70	Sri Lanka	< http://www.enviromulchuk.co.uk/E_Coir.htm >
43.44	0.25	45.84	India	< http://www.ccriindia.org/Portal/cict/articles/agritex.pdf >
34.9	16.8	32.1	Thailand	Asasutjarit et al. (2005)
23-43	3-12	35-45	Brazil	< http://www.cpatc.embrapa.br/publicacoes_2005/cot-36.pdf > ⁽⁷⁾
33-40	0.15-0.25	41-46	Brazil	< http://www.cpatc.embrapa.br/publicacoes_2005/cot-36.pdf > ⁽⁸⁾
34.9±35.5	17.3±18.0	35.7±36.6	Philippines	van Dam et al. (2006c) ⁽⁹⁾
35.1(0.3)	16.8(0.3)	33.6(0.1)	Philippines	van Dam et al. (2006c) ⁽¹⁰⁾
32-43	0.15-0.25	40-45	Malaysia	Taj et al. (2007)
36-43	0.15-0.25	41-45	India	Bismarck et al. (2001)
Dwarf-green coir				
30-34	9-11	57-64	Brazil	this work
Dwarf species				
32.65	7.95	59.4	Jamaica	Jústiz-Smith et al. (2008)

(¹) The values are respectively the minimum and maximum obtained by different maturities degree. (²) Two different varieties were analyzed: Rennel Island Tall (RIT) and Laguna Tall (LAGT). Highest quality from Kerala (India) were used for comparison in fibers testing. (³) The author concluded that only slight differences can be observed between mature coconut husks of different origin, and all are suitable as input feedstock for boards production. (⁴) Mature coconut fibers. (⁵) Green coconut fibers. (⁶) % of Holocellulose (mixture of cellulose and hemicellulose, a fibrous residue that remains after the extractives, lignin and the ash-forming elements have been removed). (⁷) Green coconut fibers (7-8 months – white fiber); (⁸) Mature coconut fibers (11-12 months – brown fiber). (⁹) Six different varieties were analyzed: Tagnanan Tall (TAGT), Baybay Tall (BAYT), Laguna Tall (LAGT), Catigan Green Dwarf (CATD), Rennel Island Tall (RAT) and Agta Tall (AGAT). Average values of varieties (TAGT), (BAYT), (LAGT), (RIT) and (AGAT). (¹⁰) Only (CATD) values.

4.2 Confecção de Painéis por Auto-Adesão

4.2.1 Preâmbulo Teórico

Um tecido, por definição, é um agregado de células similares, que desempenham, de maneira ordenada, uma função particular (HOUAISS, 2001). Dentro do contexto dos tecidos vegetais a complexa molécula lignina é apontada como a responsável pela ligação/adesão entre as células vegetais, tanto as que têm a finalidade de conferir estabilidade estrutural à planta, como as de preenchimento. Essa ligação/adesão ocorrem à medida que são alteradas as características de rigidez dos tecidos vegetais por meio da deposição de lignina, principalmente, na camada S₂ da parede celular e na lamela média. Então, para que o processo de auto-adesão seja possível para materiais lignocelulósicos, um dos principais fatores é o teor relativo desta molécula no tecido a ser utilizado ou no indivíduo como um todo. (IBACH, 2010; FIGUEROA et al., 2009)

No entanto, a concentração de lignina não é apenas o único fator limitante. Conforme os trabalhos que serão apresentados a seguir, existem outras variáveis relevantes para que se observe o fenômeno da auto-adesão. Dentre eles valem ser destacados a temperatura, a pressão de prensagem, o teor relativo de umidade das fibras ou partículas, o tempo de prensagem e a composição química do material. O tempo e a temperatura de prensagem promovem a mudança no estado físico da lignina tornando plástica, dentro de uma faixa conhecida como *transição vítrea*. O teor de umidade influi diretamente sobre a temperatura de transição vítrea de maneira inversamente proporcional. E a pressão/carga asseguram o contato da lignina com as partículas e polímeros lignocelulósicos os fusionando entre si. Sendo mantido esse contato enquanto a lignina amolecida recupera sua rigidez, isto é, à medida que perde calor, é possível unir dois materiais lignocelulósicos. (FRIHART, 2006; IBACH, 2010; HASHIM et al., 2011)

4.2.2 O Processo da Auto-Adesão

O setor de painéis de madeira e chapas de fibras têm expressiva representatividade dentro deste crescente mercado, e contrariando a especulação de uns e outros a comercialização dos compensados não se extinguiu com a entrada do MDF no setor. Então, a soma desse fato com as novas demandas por produtos menos poluentes e de baixo impacto am-

biental provocaram a pesquisa de substitutos para o componente mais oneroso e escasso presente na confecção do compensado, o adesivo.

O processo de auto-adesão para fibras de madeira já tem sido observado nos procedimentos de fabricação de chapas de fibra dura. Bouajila et al. (2005) explicam que a resistência observada para esses tipos de painéis é devido a dois fatores: *I*) às ligações lignina-lignina e lignina-polissacarídeo formadas em temperaturas elevadas; *II*) à plasticidade adequada do material utilizado, logo, aquela que favoreça um contato ótimo entre os elementos que compõem o painel. Hashim et al. (2011) descrevem que a ocorrência da auto-adesão em materiais lignocelulósicos se deve às reações de ativação dos compostos químicos presentes nas partículas e à fusão física entre as partículas à medida que calor e pressão são aplicados.

Windyorini (2005) aponta outros fatores influentes no processo. Em seu trabalho ficam claros que estes são: o tipo de tecido vegetal e o método de prensagem (sobretudo quanto à utilização ou não de água). Os painéis confeccionados com a porção fibrosa de *Hibiscus cannabicus* L. apresentaram propriedades físicas superiores às dos painéis confeccionados com o bagaço de *H. cannabicus*. E o tratamento com vapor conferiu melhor estabilidade dimensional aos painéis. Hunt e Supan (2006) procurando dar utilidade às galhadas de *Pinus contorta* obtiveram sucesso na confecção de um painel através da auto-adesão destes materiais. Para tanto os autores utilizam o método de prensagem úmida para a elaboração dos painéis, uma vez que este processo maximiza a adesão e o contato fibra-a-fibra. Hashim et al. (2011) enfatizam que a cura proveniente desse contato e a concomitante adesão são as etapas mais pertinentes para a auto-adesão.

Ando e Sato (2008) apresentam que o tamanho das partículas também é relevante para a qualidade da adesão. Segundo os autores a substituição do adesivo por finos de *H. cannabicus* na confecção de compensados de *Criptomera japonica* foi possível, e as melhores adesões observadas foram aquelas que utilizaram finos com diâmetro médio de 10µm que os confeccionados com os de 53 µm. Num primeiro momento, pode-se entender que o processamento mecânico das fibras, como seriam a moagem ou a trituração, permitiria um melhor contato entre partículas por conta do aumento da superfície de contato a medida que as fibras são cortadas. No entanto, Velásquez et al. (2002) apontam que o processamento mecânico auxilia no desprendimento das fibras umas das outras, algo que, posteriormente, permite um melhor contato fibra-a-fibra.

Outro fator importante é a temperatura em que as partículas são prensadas. Wansanook e Sato (2009) apontam que os painéis produzidos com partículas de *Phyllostachys*

reticulate (bambu) apresentaram melhores performances à medida que a temperatura de prensagem aumentava (de 160 a 200 °C) e a proporção de finos de 0,5 mm era maior. Os autores conferem os melhores resultados ao ganho de resistência de ligação interna.

As mudanças de temperatura na madeira são capazes de produzir alterações significativas em seus principais componentes moleculares (Tabela 2), como a celulose, hemicelulose e lignina. Componentes estes também constituintes dos demais materiais lignocelulósicos, tal como é a fibra de coco. Portanto é de se esperar que os mesmos eventos descritos por Schaffer (1973, APUD: FIGUEROA, 2009) sejam observados durante a confecção dos compósitos produzidos pela auto-adesão de suas partículas, sobretudo as que promovem a passagem da lignina do estado sólido para o fluido. Ou seja, presumindo que o comportamento dos constituintes químicos presentes nas fibras de coco sejam os mesmos das fibras de madeira, a pesar de o coqueiro ser uma planta C₃ e as folhosas madeireiras serem plantas C₄.

TABELA 2 – Alterações provocadas termicamente na madeira seca em atmosfera inerte.

TEMPERATURA (°C)	ALTERAÇÕES NA MADEIRA
55	A estrutura natural da lignina é alterada. A hemicelulose começa a amolecer.
70	Começa a retração transversal da madeira.
110	A lignina lentamente começa a perder peso.
120	O teor de hemicelulose começa a diminuir e celulose alfa começa a aumentar. A lignina começa a amolecer.
140	A água de impregnação é liberada.
160	A lignina se funde e começa a ressolidificar.
180	A hemicelulose começa a perder peso rapidamente depois de ter perdido 4 %. A lignina da membrana de pontuação escoa.
200	A madeira começa perder peso rapidamente. As resinas fenólicas começam a se formar e a celulose a se desidratar.
210	A lignina solidifica. A celulose amolece e se despolimeriza. As reações endotérmicas transformam-se em exotérmicas.
225	A cristalinidade da celulose diminui e é retomada.
280	A lignina atinge 10% de perda de peso. A celulose começa a perder peso.
288	Temperatura adotada para carbonização da madeira.

Fonte: SCHAFFER (1973, APUD: FIGUEROA, 2009), resumido.

Portanto, com base no exposto, o processo da auto-adesão para materiais lignocelulósicos pode ser resumido como: *a precisa degradação térmica dos polímeros presentes no material vegetal de tal maneira que as unidades fibrosas ou particuladas sejam aderidas umas às outras, permitindo a formação de um único corpo sólido dotado de propriedades físicas e mecânicas próprias.* Segundo Bouajila et al. (2005) um compósito fibroso ideal deve ser produzido a uma temperatura superior a mais elevada temperatura de transição vítrea dentre todos os polímeros que o constituem. Daí a justificativa para os processos de produção de chapas de fibra serem realizados entre 180 e 200 °C, pois o amolecimento de fibras de madeira secas ocorre próximo aos 180 °C, como também a lignina presente nas pontoações na parede celular passa a escoar.

4.2.3 Referencial Teórico

Van Dam et al. (2004a) produziram, caracterizaram e compararam os resultados obtidos pelas chapas de fibras de coco por auto-adesão com os obtidos pelo MDF e chapa de partículas (não especificado). Os autores utilizaram cocos frescos, os quais tiveram o seu mesocarpo extraído do fruto, e processados pelos métodos de extrusão, trituração e desfibramento por descarga de vapor (*steam explosion*). Depois de desprendidas do fruto, as fibras obtidas por cada técnica de desfibramento foram utilizadas na confecção dos painéis por prensagem quente.

Os resultados demonstraram que a trituração, seguida de prensagem sob 300 e 750 kN, a 180 °C, entre 3 e 30 minutos de prensagem foram os que produziram os painéis mais resistentes (Figura 10 esquerda). Estes apresentaram: rigidez de 5.000 MPa; resistência de 50 MPa; inchamento de 8,17 % e absorção de água de 8,24 %, após 24 h de imersão. O inchamento para o MDF e compósito de partículas foi de 21 % e a absorção foi de 65 %, após 24h de imersão. A resistência encontrada para o MDF foi de 15 MPa e a rigidez de 3.000 MPa. As densidades finais dos painéis de fibra de coco estavam entre 1,3 e 1,4 g/cm³ e as do MDF estavam entre 0,8 e 0,7 g/cm³. Nesse mesmo trabalho os autores apresentam algumas imagens de painéis 3D também confeccionados com fibra de coco (Figura 10 direita).

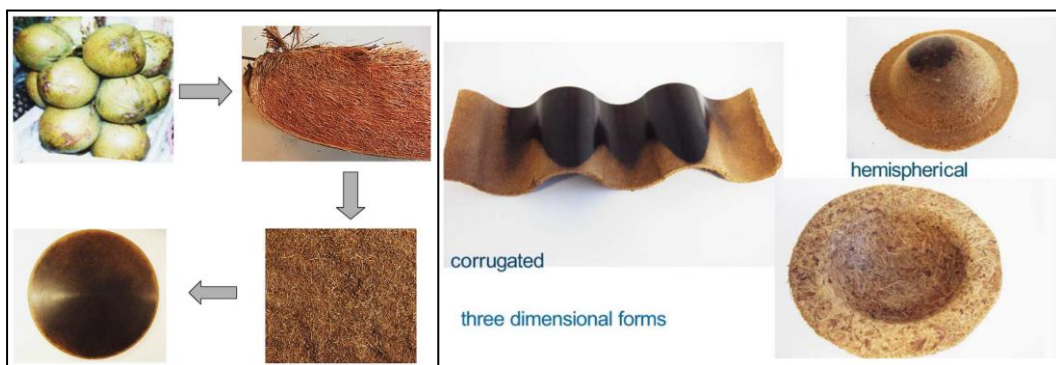


FIGURA 10 – *ESQUERDA*: Ilustração dos procedimentos adotados por van Dam (2004a) para a produção de chapas de fibra coco. No sentido horário: cocos verdes; mesocarpo separado da semente; mesocarpo triturado em picador agrícola; painel de fibra de coco. *DIREITA*: Exemplos de compósitos 3D confeccionados a partir de fibras de coco (van Dam et al., 2004a).

Associando a informação da temperatura de prensagem de van Dam et al. (2004a) com os dados da Tabela 2, à temperatura de 180 °C a lignina presente na pontoação da membrana celular escoa e a densidade dos painéis produzidos pelo referido autor é a mesma da própria fibra. Portanto, os autores modificaram a maior quantidade possível de lignina e asseguraram um contato ideal entre as partículas.

Van Dam et al. (2006) também apontam que as características de inchamento e absorção de água por parte das fibras, e consequentemente do painel como um todo, são devidos à grã de 45 ° das microfibrilas (Figuras 4C ou 6B).

5 Metodologia

5.1 Obtenção e Processamento das Fibras

O material mesocárpico fibroso do coco verde (*Cocos nucifera* L.) foi adquirido com a empresa Coco Comandatuba (Ilhéus, BA), que colhe os frutos sete ou oito meses após a sua inflorescência. O fardo de 60 kg de material foi desfibrado e o seu conteúdo foi manualmente triado de maneira a separar as fibras das impurezas encontradas. Posteriormente as fibras selecionadas foram processadas em picador agrícola com peneira de 8 mm Ø, para reduzir a heterogeneidade dimensional das fibras.

5.2 Caracterização das Partículas de Coco

Para fazer distinção entre *fibras* segundo a anatomia vegetal e as *fibras* como material vegetal de aspecto fibroso; doravante os primeiros continuarão como *fibras* enquanto que os segundos serão denominados *partículas*.

5.2.1 Comprimento e Espessura

Após terem sido trituradas, as partículas tiveram seus comprimentos e espessuras medidos a partir de duas amostras, das quais foram escolhidas 200 partículas para cada medição. As espessuras foram medidas com o auxílio de um paquímetro digital com precisão de 0,01 mm. Os comprimentos, por sua vez, foram medidos com o auxílio de uma régua com precisão de 1,0 mm.

5.2.2 Determinação da Umidade das Partículas

A umidade das partículas foi determinada através do medidor de umidade Gehaka IV 3000 do tipo halógeno a partir de duas amostras com pelo menos um grama de massa, mínima que o aparelho exige. Este aparelho mede a umidade através da variação da massa de um material à medida que a água contida nele evapora, logo são observados um valor máximo (com umidade) e o de massa constante (seco). A evaporação da água ocorre medi-

ante ao acendimento de uma lâmpada localizada acima do prato que contém a amostra do material. A umidade determinada pelo aparelho é medida por meio da equação [1]:

$$U = 100 - \left(\frac{P_f}{P_i} \cdot 100 \right) \quad [1]$$

Onde:

P_f – massa final (g)

P_i – massa inicial (g)

U – umidade (%)

5.3 Confeção dos Painéis

Com as partículas processadas foram formados colchões com 1,3 kg de massa e dimensões de 30 cm x 30 cm de área em secção transversal. Tendo em vista a obtenção de um painel com densidade mínima de 0,7 g/cm³ e 15 mm de espessura, sem o auxílio de espaçadores para fixar a espessura, os colchões foram prensados numa prensa hidráulica INDUMEC à temperatura de 190 °C a uma pressão específica de 3,9 MPa. Foi adotado um ciclo de prensagem simples, no qual a prensa pré-aquecida em 180 °C foi carregada com o colchão e em seguida foi aplicada uma carga suficiente para que os painéis apresentassem a pressão específica apontada anteriormente.

A temperatura interna do colchão foi acompanhada por meio de um termômetro digital associado com dispositivo de armazenamento de dados (*datalogger*) modelo iCel TD-890, cujo sensor tipo K foi posicionado na porção central de uma das laterais do colchão. Para cada painel produzido foi registrado o tempo decorrido entre o fechamento da prensa e o alcance dos 190 °C.

5.3.1 Tratamentos

Foram realizados dois tratamentos; no primeiro (T₁₀), os painéis foram confeccionados com as partículas à umidade de equilíbrio e o segundo (T₂₀) com as partículas acrescidas de uma massa de água correspondente ao incremento de 10 % de umidade (base se-

ca). O motivo para se alterar as umidades das partículas se deve à sua influência sobre a temperatura de transição vítrea da lignina bem como na rigidez de fibras vegetais.

5.3.2 Caracterização Físico-Mecânica dos Painéis

Os painéis fabricados foram alocados dentro de sala de climatização, a umidade relativa de $65 \pm 2 \%$ e temperatura de $20 \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$. Posteriormente, foram esquadrejados e foram cortados os corpos de prova. A partir dos corpos de prova climatizados com 12 % de umidade interna foram determinadas as densidades aparentes (ρ_a) de cada painel.

A caracterização física e mecânica dos painéis foi realizada por meio dos ensaios de flexão estática, inchamento em espessura e absorção de água (2 e 24 horas de imersão em água). Estes ensaios foram conduzidos de acordo com a norma brasileira NBR 14.810-2 (2002). Também foi avaliada a resistência à tração perpendicular (ligação interna), conforme estabelecida pela ASTM D 1037-99.

Uma metodologia não destrutiva foi utilizada para determinar o módulo de Elasticidade Dinâmico (E_d), a qual que se vale da técnica de ondas de tensão. Os valores de E_d foram calculados através da determinação do tempo gasto para que uma onda mecânica se propague através de um corpo sólido ao longo de um vão conhecido.

Os valores calculados foram originalmente expressos em quilogramas por centímetro quadrado (kgf/cm^2) ao invés de megapascal (MPa) para todas as características mecânicas estudadas, exceto o módulo de elasticidade dinâmico, então a conversão entre as unidades foi feita mediante o seguinte fator de conversão:

$$1 \text{ MPa} = 10,197162 \text{ kgf} \cdot \text{cm}^{-2}$$

Os ensaios de flexão estática foram realizados em uma máquina de ensaios universal Emic DL de 300.000 N de capacidade de carga.

Os cálculos dos módulos de elasticidade (E_M) e de ruptura (f_m) foram feitos utilizando os dados obtidos nos ensaios de flexão estática realizados conforme a NBR 14.810 (2002), equações [3] e [2], respectivamente. Os valores de tensão e deformação foram obtidos por meio de análises de gráficas dentro do limite de proporcionalidade.

$$f_m = \frac{1,5P_r L}{bh^2} \quad [2]$$

$$E_M = \frac{(P_2 - P_1)L^3}{48(D_2 - D_1)I} \quad [3]$$

Onde:

b – base do corpo de prova (cm)

D_1 e D_2 – deformação (cm) observada quando uma tensão P é aplicada dentro do limite de proporcionalidade

E_M – módulo de elasticidade (kgf/cm²)

f_m – módulo de ruptura (kgf/cm²)

h – espessura do corpo de prova (cm)

L – vão de ensaio (cm)

P_1 e P_2 – tesões aplicadas dentro do limite de proporcionalidade (kgf)

A metodologia não destrutiva de ondas de tensão utiliza a velocidade de propagação de ondas mecânicas ao longo de um vão conhecido para determinar o módulo de Elasticidade Dinâmico (E_d). Conhecendo-se o tempo de propagação e o comprimento deste vão de prova é possível calcular a velocidade de propagação da onda (v_0). Portanto, para a medição dos tempos de propagação, foi utilizado o aparelho *Stress Wave Timer* modelo 239 A da Metriguard Inc., cuja precisão é de 1.10^{-6} segundos. Esse aparelho mede o tempo decorrido entre o registro de entrada acionado pelo primeiro acelerômetro, posicionado numa extremidade do vão, e o segundo registro do outro acelerômetro, localizado na extremidade oposta do vão em relação ao primeiro. Os valores de E_d e v_0 são obtidos por meio das equações [4] e [5].

$$v_0 = \frac{L}{t \cdot 10^{-6}} \quad [4]$$

$$E_d = v_0^2 \cdot \rho_a \cdot 10^{-6} \quad [5]$$

Onde:

E_d – elasticidade dinâmica em MPa

L – vão percorrido pela onda (m)

g – aceleração da gravidade (9,084 m/s²)

t – tempo de propagação da onda (μs)

ρ_a – densidade aparente a 12 % de umidade (kg/m³)

Os cálculos para determinação do inchamento em espessura e absorção de água após 2 h e 24 h foram realizados conforme a NBR 14.810 (2002) e calculados conforme as equações [6] e [7].

$$I = \frac{E_f - E_i}{E_i} \cdot 100 \quad [6]$$

$$A = \frac{M_f - M_i}{M_i} \cdot 100 \quad [7]$$

Onde:

A – absorção (%)

E_i – espessura inicial (mm)

E_f – espessura final (mm)

I – inchamento (%)

M_i – massa inicial (g)

M_f – massa final (g)

Também conhecidos como ensaios de resistência de Ligação Interna (LI), a resistência à tração paralela avalia a adesão das fibras umas às outras. Esta foi determinada seguindo a metodologia da ASTM 1037-99, e calculada conforme a equação [8]. Para este ensaio foi utilizado o adesivo bicomponente de resina epóxi de Araldite 2 min. para realizar a adesão do corpo de prova ao dispositivo de teste. Os ensaios de LI foram conduzidos numa máquina de ensaios universal Instron com célula de carga de 200 kg.

$$LI = \frac{P}{l_1 * l_2} \quad [8]$$

Onde:

LI – Ligação Interna (kgf/cm²)

P – carga máxima (kgf)

l_1 e l_2 – laterais do corpo de prova (cm)

5.3.3 *Determinação do Poder Calorífico Superior (PCS) e Carga de Incêndio específica (q_{fi})*

Foram realizados ensaios de calorimetria para determinar o Poder Calorífico Superior (PCS) dos compósitos desenvolvidos. E a partir dos dados de PCS foi estimada a Carga de Incêndio Específica (q_{fi}) dos painéis produzidos pelos tratamentos T₁₀ e T₂₀. Esta informação é relevante para a elaboração de procedimentos de segurança que consideram o planejamento de evacuação de edifícios, o combate a incêndios e às análises de risco de incêndios; todos amplamente empregados no exterior (SNZ PAS 4.509:2008; ZALOK, 2011; *Code of Practice for Fire Safety in Buildings*, 2012, Hong Kong). Em nível nacional existem: a NBR 14.432 (2001); instruções técnicas do Corpo de Bombeiros, merecendo destaque a IT nº 08/2011; e o Decreto Nº 45.076 do Governo do Estado de São Paulo. E de imediato se levanta o questionamento se há necessidade de se estimar o potencial energético de painéis e compósitos lignocelulósicos, bem como a apresentação desta informação no inventário de materiais utilizados na construção de edificações e demais ambientes voltados à ocupação humana.

Segundo a NBR 14.432 (2001) a Carga de Incêndio é definida como:

“Soma das energias caloríficas que poderiam ser liberadas pela combustão completa de todos os materiais combustíveis em um espaço, inclusive os revestimentos das paredes divisórias, pisos e tetos.”

E, segundo a mesma norma, a Carga de Incêndio Específica (q_{fi}) é expressa em megajoules (MJ) por metro quadrado (m^2), sendo determinado pela equação [9] e definida como:

“Valor da carga de incêndio dividido pela área de piso considerado.”

$$q_{fi} = \frac{\sum M_i * H_i}{A_f} \quad [9]$$

Onde:

q_{fi} – carga de incêndio específica (MJ/m²)

M_i – massa total de cada componente i do material combustível (kg)

H_i – potencial calorífico específico de cada componente i do material combustível (MJ/kg)

A_f – área do piso do compartimento (m²)

Então, considerando potencial de uso destes painéis como material de revestimento, preenchimento, isolamento acústico, etc., entende-se ser relevante a estimativa do q_{fi} como informação de segurança. Cujos procedimentos de cálculo para a determinação desta propriedade a partir do PCS estão apresentados mais adiante.

Os valores do PCS, determinados para cada tratamento, foram realizados segundo a NBR 8.633 (1984) para ensaio isoperibol a 450 PSI de atmosfera de oxigênio. Para tanto as amostras dos compósitos (Figura 11), de cada tratamento, foram processadas em moinho de facas até se obter uma massa mínima necessária para a realização de pelo menos três ensaios. Os finos utilizados foram aqueles que passaram através de peneira com 60 mesh (0,25 mm) de abertura. A secagem ocorreu a 105 ± 2 °C, para a completa retirada de umidade das amostras, a qual se encerrou quando estas apresentaram massa constante. Os equipamentos utilizados na determinação do PCS foram:

- Estufa com renovação de ar Marconi modelo MA 035
- Placas de Petri
- Calorímetro PARR modelo 1261
- Filtro de água EBCO-RLF5X
- Filamento PARR nº 45C10 (2,3 cal/cm)
- Unidade de armazenamento de água PARR modelo 1563
- Secadores Pyrex
- Pipeta volumétrica
- Cadinhos e espátulas metálicas
- Balança Bel com precisão de 0,1 mg

A NBR 8.633 (1984) bem como o equipamento utilizado calculam o PCS em kcal/kg, porém o Sistema Internacional adota o Joule (J) como unidade energética. Portanto a seguinte conversão de unidades foi utilizada:

$$1 \text{ kcal. kg}^{-1} = 0,00419002 \text{ kJ. g}^{-1}$$

Como a densidade aparente foi determinada com corpos de prova a 12 % de umidade e o PCS a zero por cento, então o PCS foi corrigido para o Poder Calorífico Útil (PC_U) para o mesmo teor de umidade que a densidade ($PC_{12\%}$) conforme as equações [10] e [11].

$$PC_U = PCI * \left[1 - \left(\frac{u}{100} \right) \right] - 6 * u \quad [10]$$

$$PCI = PCS - \left[600 * \left(\frac{9*h}{100} \right) \right] \quad [11]$$

Onde:

PC_U – Poder Calorífico Útil a umidade u (kcal/kg)

PCI – Poder Calorífico Inferior (kcal/kg)

PCS – Poder Calorífico Superior (kcal/kg)

u – umidade do material (%)

h – teor de hidrogênio no material (%)

A determinação da q_{fi} foi realizada através dos produtos entre o Poder Calorífico Útil (PC_U), a densidade e a espessura dos painéis; conforme demonstrado nas equações [12] a [15].

$$q_{fi} = PC_{12\%} * \rho_a * Esp. \quad [12]$$

$$q_{fi} = \frac{kJ}{g} * \frac{g}{cm^3} * mm \quad [13]$$

$$q_{fi} = \frac{\frac{kJ * mm}{10^3 * 10^3}}{\frac{cm^3}{10^6}} = \frac{MJ * m}{m^3} \quad [14]$$

$$q_{fi} = MJ/m^2 \quad [15]$$

Onde:

q_{fi} – Carga de Incêndio Específica (MJ/m²)

$PC_{12\%}$ – Poder Calorífico Útil a 12% de umidade (kJ/g)

ρ_a – Densidade aparente dos painéis a 12 % de umidade (g/cm³)

$Esp.$ – Espessura dos painéis (mm)

5.3.4 Confecção dos Corpos de Prova

Partindo dos compósitos prontos os corpos de prova foram cortados conforme a Figura 11. Seguindo, no entanto, uma ordem de cortes e ensaios. Primeiro foram cortados e ensaiados os corpos de prova para o teste de flexão estática, posteriormente estes foram cortados para os ensaios de inchamento em espessura, absorção de água e tração perpendicular.

As dimensões dos corpos de prova seguiram as medidas estabelecidas pela norma NBR 14.810 (2002), a qual descreve métodos de ensaios para compósitos aglomerados. Então, a partir de cada painel esquadrejado, foram cortados cinco corpos de prova com 5

cm de largura (Figura 11: Linha de Corte azul claro), os quais tiveram seus centros marcados e a partir destes foram demarcados vãos de 20 cm para os ensaios de flexão estática. O comprimento dos corpos de prova para os ensaios de flexão era o mesmo dos painéis esquadrejados na forma de um quadrado com 28 cm de lado.

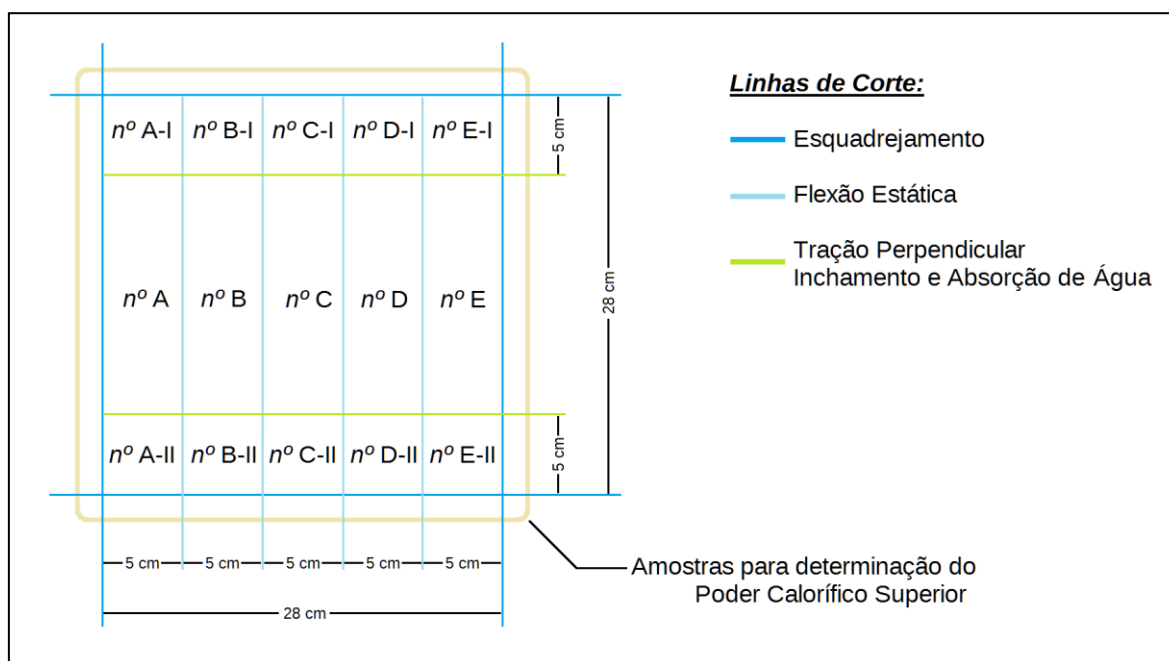


FIGURA 11 – Diagrama de esquadrejamento dos compósitos, preparação e notação dos corpos de prova para os ensaios físicos e mecânicos. Notação: n° - numeração do painel; $n^\circ + A, B, C, D, E$ – corpos de prova para ensaios de flexão estática; $n^\circ + A, B, C, D, E + I, II$ – corpos de prova para ensaios de tração perpendicular, inchamento e absorção de água.

Depois de terem sido utilizados nos ensaios de flexão, de cada corpo de prova, foram cortados dois corpos de prova de 5 cm x 5 cm de cada extremidade (Figura 11: Linha de Corte verde). Do total, para cada tratamento, 20 foram escolhidos para a realização dos ensaios de inchamento e absorção de água após 2 e 24 horas de imersão, seguindo os procedimentos da NBR 14.810 de 2002; e dos demais 20, somente 14 foram escolhidos para os ensaios de tração perpendicular (LI) conforme a ASTM 1037-99.

5.4 Análise de Dados

Uma vez obtidos os dados e os valores referentes à espessura, ρ_a , f_m , E_M , ν_0 , E_d , LI, I e A foi realizada a descrição estatística destas variáveis considerando a média aritmética ou harmônica, desvio padrão, número de repetições e valores máximos e mínimos obtidos ou observados.

A comparação dos resultados das propriedades físicas e mecânicas entre os tratamentos foi realizada por meio dos resultados das análises de variância (ANOVA) e o teste t de comparação de médias para um erro admissível de 1 ou 5 %.

Também foram analisados os valores dos coeficientes de correlação de Pearson entre as variáveis ρ , f_m , E_M , ν_0 , E_d e LI. Com base nas correlações significativas entre estas variáveis foram realizadas análises de regressão linear para desenvolvimento de modelos matemáticos que permitam determinar as propriedades mecânicas destes compósitos a partir da metodologia não destrutiva de ondas de tensão.

6 Resultados e Discussão

Todas as análises de variância e demais estatísticas e dados que por ventura não constarem, mas forem mencionados, estarão em anexo, item 9.1.

6.1 Caracterização e Processamento das Fibras em Partículas

Durante o desfibramento do fardo era notória a presença de fibras com tonalidades distintas além de uma grande variedade de impurezas. Portanto todo o material foi cuidadosamente triado de maneira a se remover a maior quantidade possível de impurezas. Dentre estas havia: pedaços de endocarpo, tecidos, fragmentos de rocha, restos de inflorescências de coqueiro, terra e pó, pedaços de insetos, dentre outros (Figura 12). Daí surge o questionamento acerca das influências ou interferências dessas impurezas sobre o desempenho mecânico dos painéis. Por conseguinte, havendo interesse na utilização dessas fibras em escala industrial, por conta de possíveis contaminações, será necessário prever etapas de limpeza do material.

Mesmo depois de processadas em picador com peneira (8 mm Ø), as partículas apresentaram grande amplitude de diâmetro e comprimento, ambas as distribuições são assimétricas positivamente, conforme apresentadas nas Figuras 13 e 14 respectivamente (e Quadros A e B). Setenta e um por cento dos diâmetros das partículas se encontram nas três primeiras classes ([0,00;0,09], [0,10;0,19] e [0,20;0,29] mm) e 82,5 % dos comprimentos também se encontram nas três primeiras classes ([0;9], [10;19] e [20;29] mm). Conforme é apresentado na Tabela 3, o diâmetro médio observado foi de 0,24 mm e desvio padrão de 0,24 e o comprimento médio de 19,96 mm e desvio de 13,72. Nota-se, no entanto, que os valores das médias aritméticas para as duas medidas tendem a superestimar a maioria dos dados, não os representando adequadamente. Por outro lado, as médias harmônicas, por serem mais sensíveis a valores pequenos, representam os dados com maior fidelidade, estimando o diâmetro médio em 0,128 mm e o comprimento em 13,91 mm.

TABELA 3 – Estatística descritiva das medidas de Comprimento e Diâmetro das partículas.

MEDIDA (mm)	Nº	Mínimo	Máximo	Média Aritmética	Média Harmônica	Desvio Padrão
Diâmetro	200	0,02	1,70	0,244	0,128	± 0,237
Comprimento	200	5,0	86,0	19,96	13,91	± 13,72

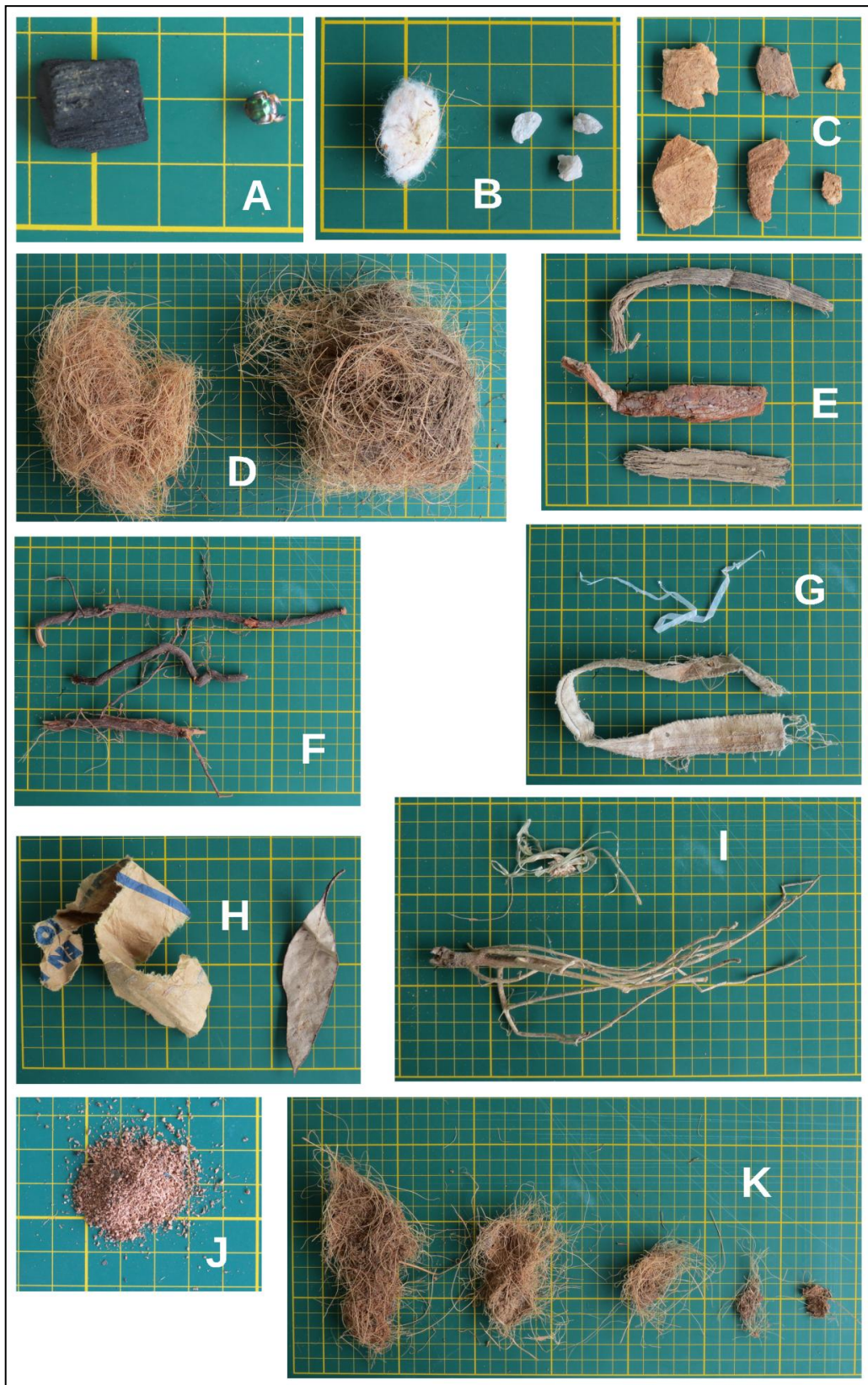


FIGURA 12 – Impurezas e contaminantes encontrados em meio às fibras: A) pedaços de carvão e inseto; B) algodão e fragmentos de rocha; C) pedaços de endocarpo; D) fibras claras e escuras; E) cascas de árvores; F) pedaços de inflorescências; G) tiras de tecido e plástico; H) folha e pedaços de embalagem; I) restos de herbáceas; J) terra; K) torrões de fibras e barro. Quadrados pequenos: 1cm x 1 cm.

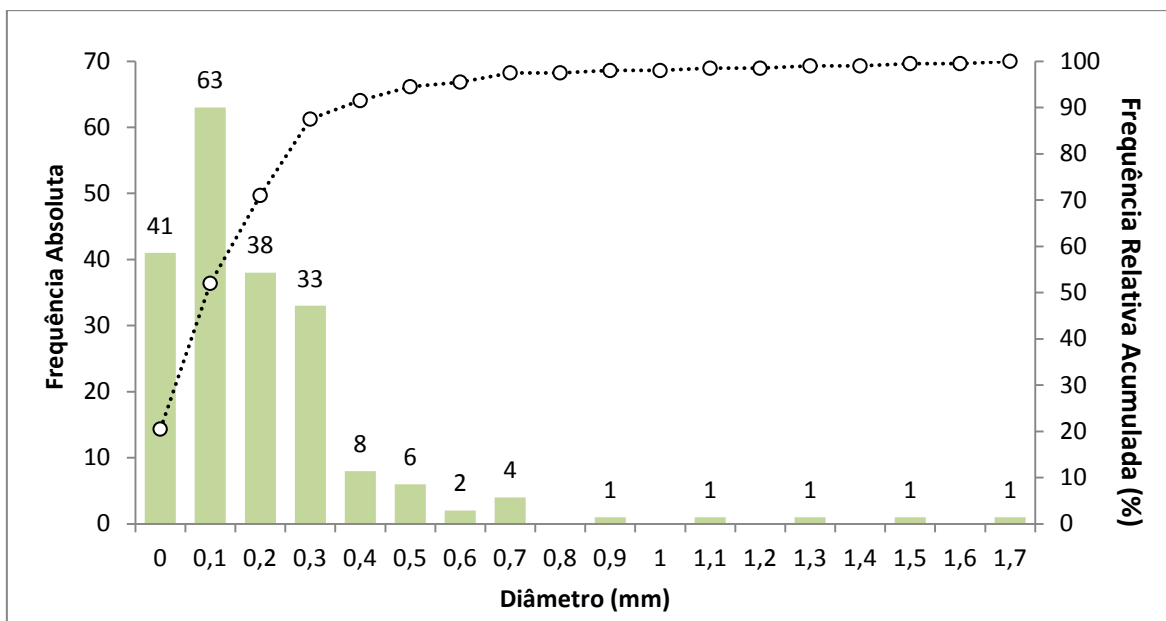


FIGURA 13 – Histograma e Curva de Frequência Relativa Acumulada para os valores de Diâmetro das partículas em classes de 0,1mm.

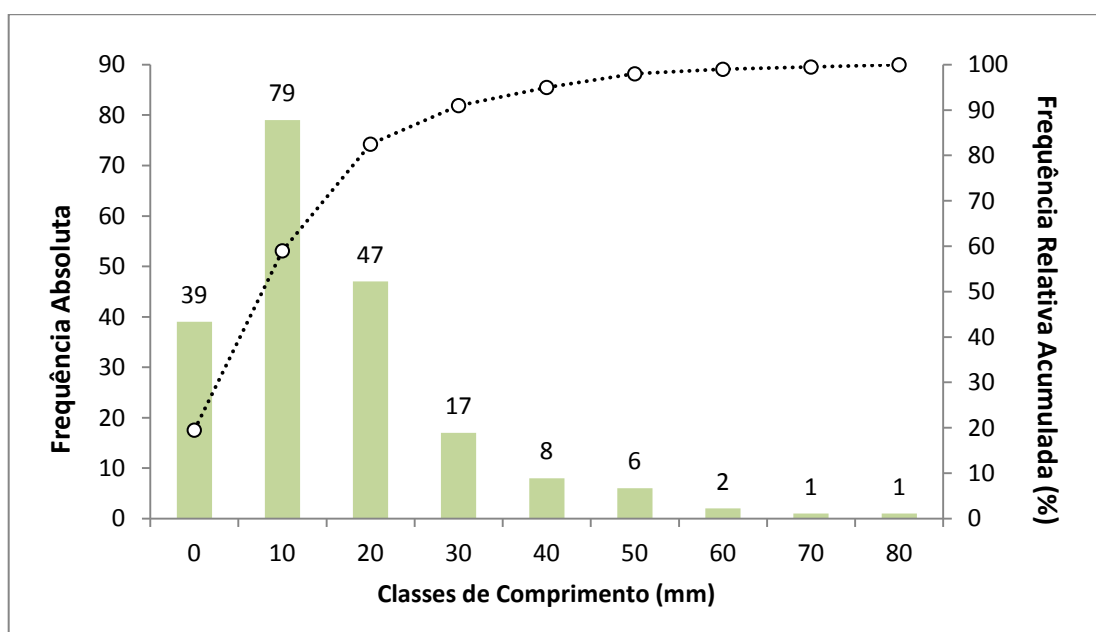


FIGURA 14 – Histograma e Curva de Frequência Relativa Acumulada para os valores de Comprimento das partículas em classes de 10mm.

Ambas as amostras de um grama de partículas apresentaram o mesmo valor de umidade de 10,3 % (Figura 15), portanto, como a massa de fibras por painel foi de 1,3 kg, a massa de água adicionada às partículas para o segundo tratamento foi de 130 g. E, para diferenciar os tratamentos, os painéis confeccionados com as partículas a umidade de equilíbrio são denominados de T₁₀ e os com partículas acrescidas em 10 % de umidade são denominados de T₂₀, pois as partículas tinham 20 % de umidade.

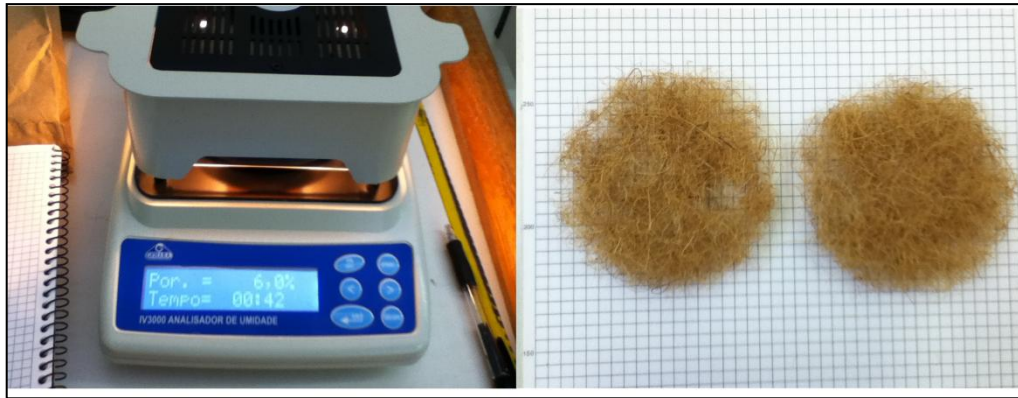


FIGURA 15 – Determinação da umidade de equilíbrio das partículas em aparelho Gehaka IV 3000.

6.2 Confeção dos Painéis

Cada painel foi confeccionado a partir de um colchão de partículas de 1,3 kg de massa, num molde articulado com área transversal de 900 cm² (30 cm x 30 cm) (Figura 16 Esquerda). Os colchões de T₂₀ apresentaram alturas inferiores às observadas para T₁₀, e, no entanto, não houve nenhuma mudança de procedimento durante a montagem dos colchões senão o número de colaboradores. A altura dos colchões de T₁₀ foi de aproximadamente 35 cm e as de T₂₀ de 25 cm. Além disso, houve diferença na área transversal dos painéis após a prensagem dos colchões entre os tratamentos; as áreas de T₁₀ foram de aproximadamente 1.156 cm², e 1.024 cm² para T₂₀. Essas diferenças apontam para uma melhor acomodação das fibras por conta do acréscimo de água.



FIGURA 16 – *Esquerda*: colchão de partículas recém-tirado do molde; *Direita*: painel recém- prensado.

Durante todo o processamento, desde o desfibramento do fardo até a montagem dos colchões, sempre houve a presença de um pó fino de cor marrom-claro. Cujas procedências aparenta ser o resíduo produzido pelo desprendimento do bagaço do coco misturado com terra. A filmagem postada no sítio do fornecedor das fibras¹ exibe os cocos recém-processados na planta sendo triturados num picador, cuja abertura de ejeção aponta para o chão de um pátio aberto. Além disso, no fundo de todos os painéis foi observada a formação de uma camada lisa amarronzada (Figura 17 Direita), a qual não foi removida mesmo depois dos ensaios de inchamento e absorção de água. Esse ocorrido também foi observado por van Dam et al. (2004a), os quais afirmam que esse resíduo também atua como uma resina aglutinante. Pois este pó é possivelmente constituído por resquícios de células parenquimatosas que compõem o mesocarpo do coco e terra, no caso específico deste estudo. É importante notar que houve uma grande redução na perda desse pó durante a montagem dos colchões de T₂₀ em função do acréscimo de água; portanto, houve uma maior incorporação deste pó em T₂₀ que em T₁₀.



FIGURA 17 – *Esquerda*: face superior dos painéis; *Direita*: face inferior dos painéis.

A adição de água às partículas antes da prensagem aumentou o tempo de prensagem. O tempo observado para os painéis de T₁₀ foi de aproximadamente 30 minutos e de 45 minutos para T₂₀, ou seja, foram necessários 15 minutos a mais para os adicionais 10 % de umidade serem removidos dos painéis. Conforme apresentado na Figura 18, essa diferença de tempo correu por conta da permanência da temperatura pouco abaixo dos 100 °C, temperatura de ebulição da água em Brasília, a qual também é próxima da temperatura de

¹ <http://www.cococomandatuba.com.br/Principal-A%20Empresa.htm>, ainda ativo em 31/01/2013.

amolecimento das fibras de madeira, que está entre 60 e 90 °C (BOUJILA et al., 2005). Como a maior parte das fibras vegetais têm uma constituição semelhante, existe uma razoável possibilidade de que essa temperatura esteja próxima às de fibras não madeireiras.

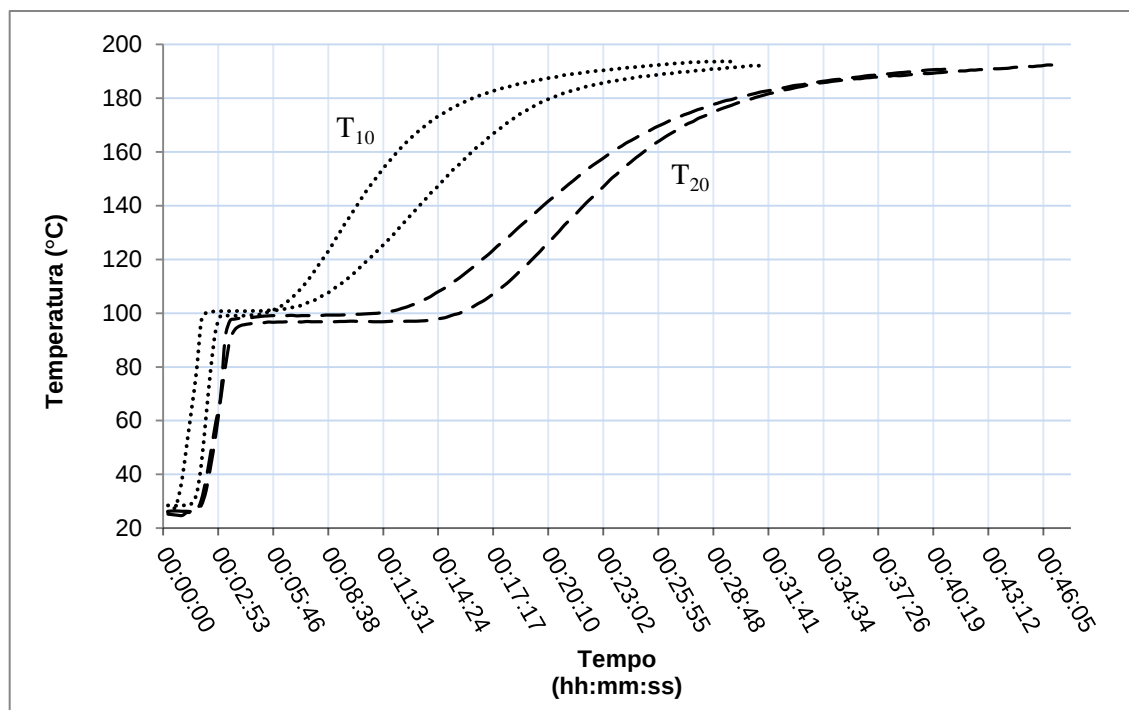


FIGURA 18 – Curvas de aquecimento durante a prensagem para ambos os tratamentos T₁₀ e T₂₀.

Houve a necessidade de se alterar a pressão no manômetro da prensa entre os tratamentos. Pois sob as condições pré-estabelecidas não haveria uma compactação adequada dos colchões, e os compósitos de T₂₀ apresentariam espessura superior a quatro centímetros, reduzindo drasticamente as suas densidades. Então a pressão no manômetro da prensa foi sendo gradativamente elevada até que os colchões de T₂₀ apresentassem uma espessura semelhante aos de T₁₀; em decorrência disso, a pressão específica dos painéis para T₂₀ passou de 3,9 MPa para 4,4 MPa. Conseqüentemente, os efeitos exclusivamente produzidos pela diferença de umidade não puderam ser avaliados diretamente, pois a umidade não foi a única fonte de variação entre os tratamentos. Ao que tudo indica, o aumento da umidade afetou a compressibilidade das partículas, resultando num colchão mais compacto, o qual necessitou de uma maior carga de prensagem para que os painéis de T₂₀ apresentassem uma espessura semelhante aos de T₁₀. Portanto, os compósitos produzidos por cada tratamento foram estatisticamente descritos e analisados separadamente a fim de verificar se as diferenças observadas entre os tratamentos são estatisticamente significativas.

6.3 Caracterização Físico-Mecânica dos Compósitos

Em linhas gerais, conforme exposto na Tabela 4, os desempenhos físicos e mecânicos dos painéis pertencentes a T₂₀ foram superiores aos de T₁₀, segundo as significâncias apresentadas pela ANOVA ($\alpha = 0,01$). Isto tanto para os ensaios destrutivos como para os não destrutivos. Esta constatação está fortemente relacionada ao fato de a densidade aparente de T₂₀ ser superior e de essa característica de estar fortemente associada às demais propriedades estudadas (Tabela 5).

TABELA 4 – Estatística descritiva para cada tratamento referente aos valores de Densidade aparente (ρ_a), Módulo de Elasticidade (E_M), Módulo de Ruptura (f_m), velocidade medida pelo *Stress Wave* (v_0), Módulo de Elasticidade Dinâmico (E_d) e Ligação Interna (LI).

TRAT.	VAR.	Nº	Mín.	Máx.	Média	Desv. Pad.
T ₁₀	ρ_a (g/cm ³)	20	0,66	0,86	0,77	0,05
	E_M (MPa)	20	160,97	1.112,02	732,13	232,10
	f_m (MPa)	20	5,03	13,11	8,70	2,32
	v_0 (m/s)	20	1.142,13	1.401,87	1.280,59	69,30
	E_d (MPa)	20	863,36	1.693,49	1.276,23	206,64
	LI (MPa)	14	0,005	0,032	0,018	0,009
T ₂₀	ρ_a (g/cm ³)	20	0,84	0,95	0,89	0,03
	E_M (MPa)	20	986,67	1.620,69	1.238,84	195,58
	f_m (MPa)	20	10,79	20,50	13,58	2,61
	v_0 (m/s)	20	1.404,06	1.539,78	1.459,61	42,57
	E_d (MPa)	20	1.699,68	2.283,29	1.935,29	171,50
	LI (MPa)	14	0,015	0,156	0,070	0,049

Ambos T₁₀ e T₂₀ apresentam uma distribuição normal para os valores de ρ_a , E_M , f_m , v_0 , E_d e LI segundo o teste de Shapiro-Wilk (sig. = 0,001, α 0,01; Tabela B, em anexo), condição pré-suposta para análises de correlação (TRIOLA, 2005). Portanto, os valores observados na Tabela 5 para os coeficientes de correlação de Pearson são válidos. Em ambos os tratamentos houve correlações significativas ao nível de 5 % e algumas para 1 %. Logo a elaboração de modelos matemáticos para a determinação das propriedades mecânicas dos compósitos utilizando a metodologia de ondas de tensão é possível, conforme será tratado mais adiante.

TABELA 5 – Correlação de Pearson entre os valores encontrados separados por tratamento para Densidade aparente (ρ_a), Módulo de Elasticidade (E_M), Módulo de Ruptura (f_m), velocidade medida pelo *Stress Wave* (v_θ), Módulo de Elasticidade Dinâmica (E_d) e Ligação Interna (LI).

TRAT.	VAR.	ρ_a	E_M	f_m	v_θ	E_d	LI
T ₁₀	ρ_a	1					
	E_M	0,83**	1				
	f_m	0,82**	0,81**	1			
	v_θ	0,86**	0,70**	0,52*	1		
	E_d	0,94**	0,79**	0,67**	0,98**	1	
	LI	-0,05	-0,14	-0,18	< 0,01	< -0,01	1
T ₂₀	ρ_a	1					
	E_M	0,46*	1				
	f_m	0,59**	0,77**	1			
	v_θ	0,77**	0,79**	0,89**	1		
	E_d	0,90**	0,74**	0,82**	0,96**	1	
	LI	0,39	0,52	0,59*	0,64*	0,58*	1

**Significativo para $\alpha = 0,01$ (2 extremidades)

* Significativo para $\alpha = 0,05$ (2 extremidades)

6.3.1 Características Físicas

O tratamento T₁₀ apresentou espessura média de $14,96 \pm 1,75$ mm (Nº = 20) e T₂₀ de $15,09 \pm 0,20$ mm (Nº = 20), estas diferenças de espessura média não são estatisticamente significativas segundo o teste da ANOVA (significância de 0,742; $\alpha = 0,05$; Tabela C e Figura A, em anexo).

A densidade é uma das características mais relevantes para os compósitos de madeira, pois está diretamente relacionada com as suas propriedades físicas e mecânicas. Afinal, em última análise, os painéis refletem as propriedades dos componentes dos quais são constituídos. Conforme o resultado do teste da ANOVA (Tabela 6) os valores de densidades entre T₁₀ ($0,77$ g/cm³) e T₂₀ ($0,89$ g/cm³) são estatisticamente diferentes (significância < 0,001; $\alpha = 0,01$). Portanto, havendo os resultados dos ensaios físicos e mecânicos entre os tratamentos serem estatisticamente distintos, estes apenas corroborariam com os valores de correlação encontrados (Tabela 5).

TABELA 6 – ANOVA ($\alpha = 0,01$) para comparação dos dados de Densidade (g/cm^3) entre os tratamentos.

	Soma dos Quadrados	gl	Quadrado Médio	F	Sig.
Entre Tratamentos	0,145	1	0,145	85,952	0,000
Dentro dos Tratamentos	0,064	38	0,002		
TOTAL	0,209	39			

Apesar de não ser possível atribuir somente à diferença de umidade, lembrando das diferentes pressões específicas dos tratamentos, os relatos até aqui apresentados apontam que acréscimo de umidade das partículas de fibra de coco é vantajoso para a confecção de compósitos pela auto-adesão das fibras de coco. As evidências são: A) menor altura do colchão de partículas; B) menor expansão superficial após a prensagem; consequentemente, C) aumentam a densidade, e; D) melhoram a padronização dos compósitos, isto é, considerando as amplitudes dos dados (Figura A, anexo). Entende-se que o aumento da umidade das fibras para 20 % (base seca) auxiliou na compactação das fibras à medida que a compressibilidade das partículas também aumentou.

Por fim, o ganho de massa médio por incorporação de umidade nos corpos de prova de flexão estática (28 cm x 5 cm), após climatização, foi maior para T₁₀ (6,13 g) e que para T₂₀ (2,67 g). Portanto, painéis mais densos apresentarão variações de massa menores em função de variações na umidade relativa do ar? Afinal eles deixam a prensa sem nenhuma umidade.

6.3.2 Propriedades Mecânicas

Concordando com as densidades, houve diferenças estatisticamente significativas entre os tratamentos para as propriedades mecânicas de E_M , f_m , ν_0 e E_d LI. Todas apresentaram significâncias inferiores a 0,001 para o teste da ANOVA ($\alpha = 0,01$), exceção feita a LI cuja significância foi de 0,01 para o mesmo erro. Conforme apresentados na Tabela 4, os compósitos confeccionados por T₂₀ apresentaram propriedades de rigidez e resistência superiores e mais consistentes que os observados para T₁₀, tanto para as metodologias convencionais quanto para a não destrutiva (vide Tabela 4 e Figura A, em anexo).

A NBR 14.810 requer uma resistência mínima à flexão de 16 MPa, portanto nenhum tratamento atendeu aos requisitos da norma, e nem se aproximaram do valor encontrado por van Dam et al. (2004a) de 50 MPa. No entanto, houve um corpo de prova pertencente ao T₂₀ que apresentou resistência de 20,5 MPa . Considerando que T₂₀, sem o uso de adesivos, atingiu 84,9 % do mínimo exigido pela norma, fica evidente o potencial desse tipo de compósito e da metodologia empregada. A diferença entre o Referencial Teórico (item 4.2.3) e os resultados obtidos neste estudo podem ser explicada pelas: diferença de variedades de coqueiro; locais de produção (Nordeste Brasileiro vs Filipinas); e quantidade de contaminantes misturados às fibras.

Os ensaios de LI, para ambos os tratamentos, as curvas de carga x deformação apresentaram uma grande variedade de comportamentos. As figuras 19 e 20 apresentam apenas três desses comportamentos para cada tratamento; e considerando as demais curvas dos outros ensaios, é possível afirmar que não houve um padrão de deformação. A curva de deformação para o corpo de prova 2A-II (Figura 19, linha vermelha) sugere uma permutação de tensões entre grupos de fibras; de maneira que enquanto um grupo de partículas se deformam e rompem, outras passam a suportar a nova carga equilibrando as tensões até que se rompam e um novo grupo passe a sustentar o novo excesso de carga.

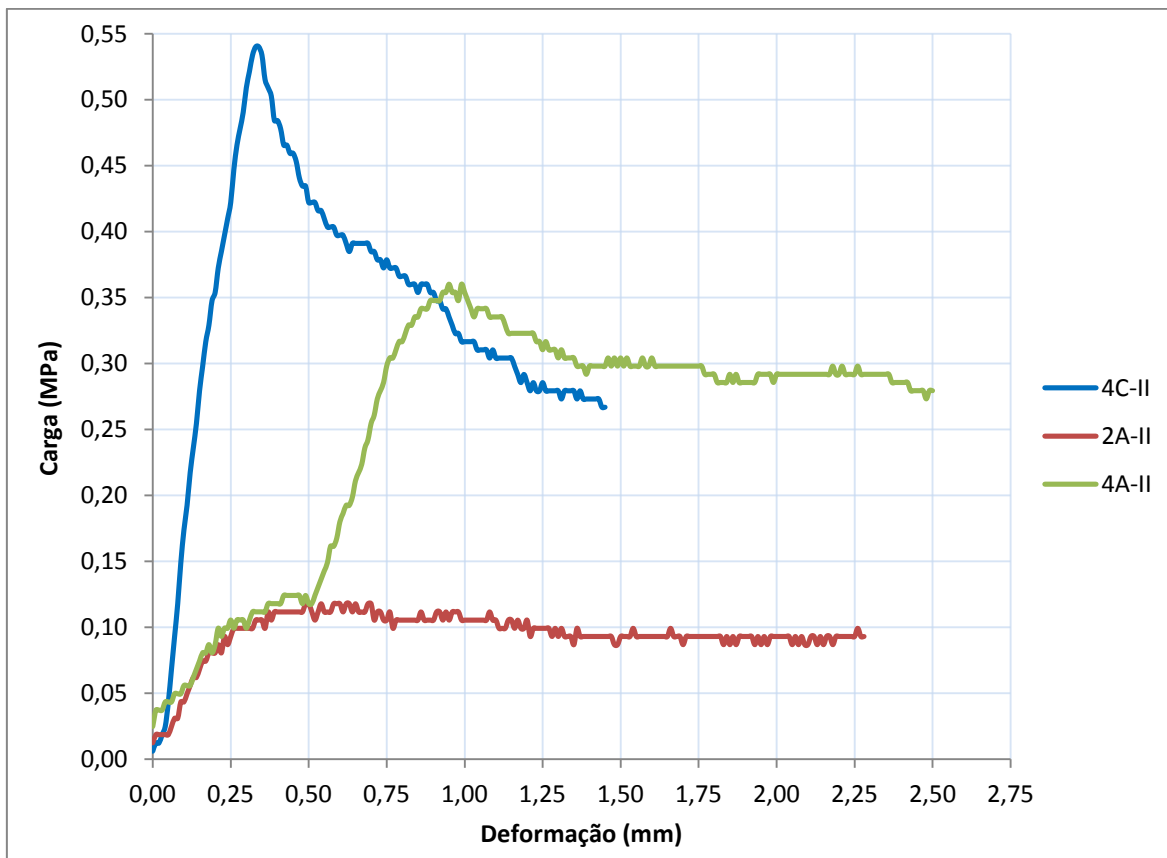


FIGURA 19 – Curvas de Carregamento e Deformação para os ensaios de Ligação Interna (LI) de T₁₀.

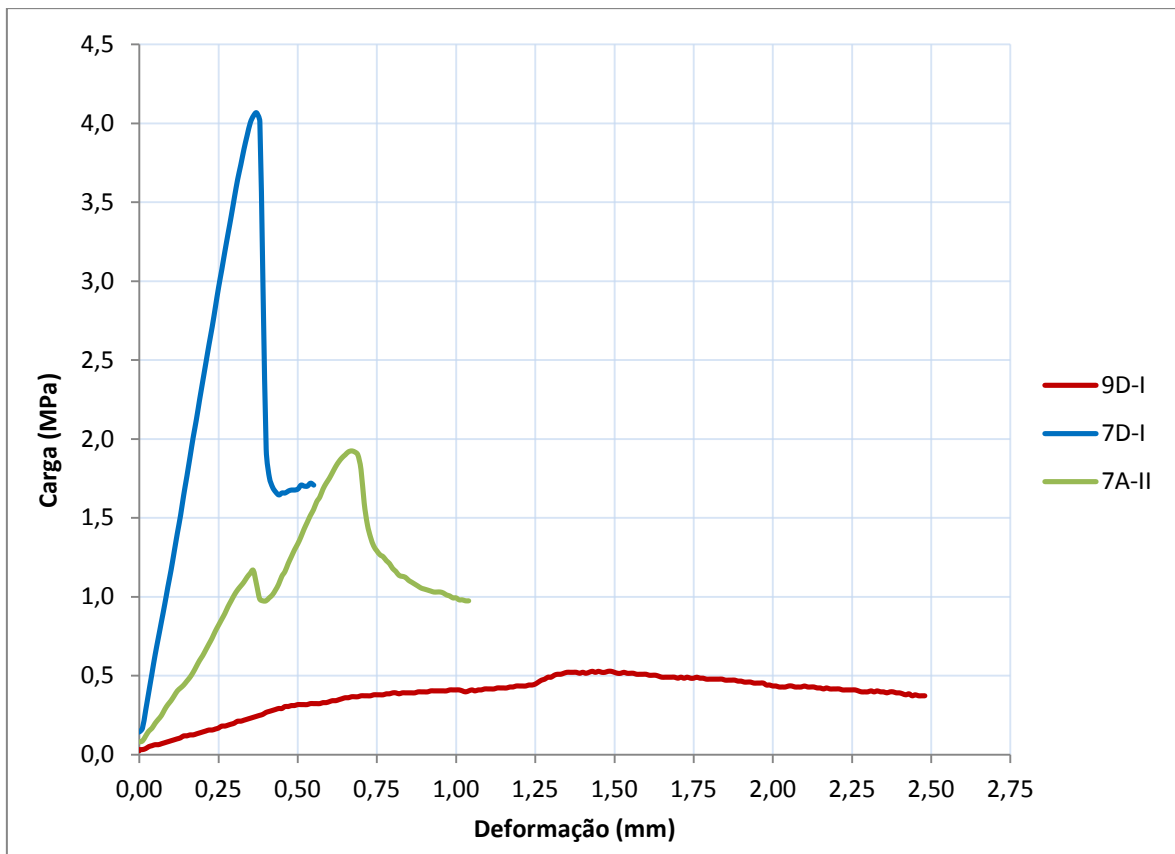


FIGURA 20 – Curvas de Carregamento e Deformação para os ensaios de Ligação Interna (LI) de T_{20} .

Ainda considerando as Figura 19 e 20, em ambos os tratamentos, pode-se notar uma semelhança entre os três comportamentos; as curvas em vermelho apresentam uma deformação suave e gradual até a observação da carga máxima; as curvas em verde apresentam dois picos de carregamento; e as curvas em azul apresentam um comportamento próximo os observados em casos de ruptura do corpo de prova.

Observando o comportamento das curvas de tensão e deformação dos painéis para os ensaios de flexão estática (Figura 21 A), foi calculado do modulo de ruptura seguindo os procedimentos da ASTM 790-03, pois esta norma prevê esse exato padrão de curva. A principal diferença entre o método utilizado neste estudo e o da ASTM 790 é o modo de obtenção dos valores de carga e deformação; usualmente se utilizam os valores de deformação observados à carga máxima, nesta ASTM se utilizam a carga a 5 % da deformação máxima observada. A fórmula de determinação do módulo de ruptura é a mesma para o f_m (equação 2), porém com valores de carga e deformação diferentes. Em nenhum ensaio foi observada a falha do corpo de prova, independentemente da orientação de solicitação aplicada (Figura 21 A), os compósito desenvolvidos neste estudo sofrem grandes deformações sem romperem (Figura 21 Bc), apresentando elevada resiliência.

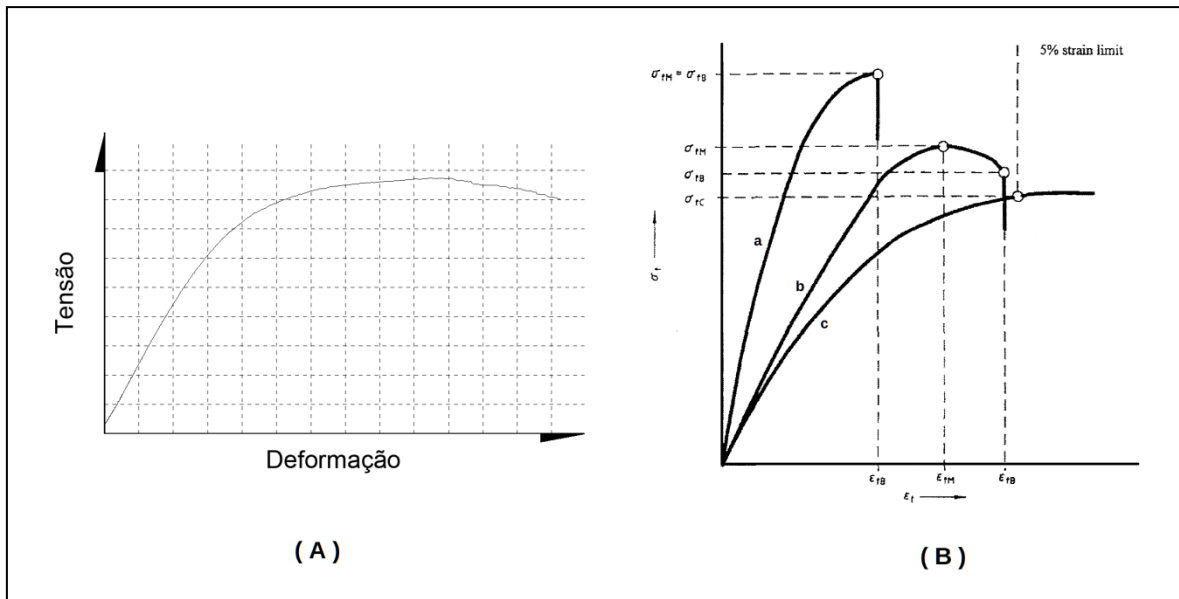


FIGURA 21 – Curvas de Tensão e Deformação. **A)** ensaios de flexão estática deste trabalho; **B)** Padrões de curvas previstas pela ASTM 790-03.

Os valores para o módulo de ruptura em flexão estática seguindo a ASTM 790 (σ_f) foram inferiores aos determinados pela f_m para ambos os tratamentos (Tabela 7). Segundo o Teste t para dados em pares (ambos tratamentos) e em duas extremidades ($\alpha = 0,05$) a diferença entre as médias de T_{10} para σ_f e f_m não são estatisticamente significativas mas para T_{20} são (0,114 e 0,007, respectivamente; Tabela E, anexo). Pode-se concluir que os procedimentos de cálculo da ASTM 790 geram valores mais conservadores que o f_m .

TABELA 7 – Valores para os Módulos de Ruptura (MOR) para os procedimentos de cálculo da ASTM 790-03 (σ_f) e o f_m .

TRAT.	Procedimento	MOR (MPa)	Desv. Pad.
T ₁₀	f_m	8,70	2,32
	σ_f	8,55	2,32
T ₂₀	f_m	13,58	2,61
	σ_f	13,32	2,62

A única variável mecânica que apresentou uma baixa correlação com as demais foi a resistência de LI. Esta variável somente apresentou correlação significativa com f_m , ν_0 e E_d apenas para T_{20} (Tabela 5). No entanto uma ressalva deve ser feita. Durante os ensaios de flexão estática do T_{10} houve um corpo de prova que apresentou um cisalhamento quase que completo ao longo da linha neutra que quase partiu o corpo de prova pela metade, por

outro lado não houve uma queda abrupta na resistência à flexão. Com isso se levanta o questionamento acerca da integridade física dos corpos de prova utilizados nos ensaios de tração perpendicular.

Durante o manuseio das sobras geradas pelo esquadreamento dos painéis era notória a diferença de esforço necessário para separar longitudinalmente com as mãos uma borda íntegra e outra manualmente flexionada. Associando esse ocorrido com os baixos valores dos módulos de ruptura observados, a pequena dureza dos compósitos sugere uma elevada susceptibilidade a fadigas sob pequenas tensões. Isso pode explicar a amplitude dos resultados de tração perpendicular (LI) para T₂₀, algo que difere do comportamento encontrado para os demais ensaios deste tratamento, os quais apresentaram uma maior consistência de resultados (Tabela 4 e Figura A).

Considerando os valores da velocidade de propagação de ondas (v_0), os valores observados para o T₂₀ foram maiores e quase não houve variação entre as medições para o mesmo corpo de prova de 20 x 5 cm. Algo que sugere uma relativa uniformidade do painel.

Por fim, nota-se na Tabela 4 que o número de repetições para os ensaios de tração perpendicular ($n = 14$) são inferiores aos demais ($n = 20$). Isso ocorreu em função do desprendimento das partículas junto às laterais dos corpos de prova 5 x 5 cm, então houve a necessidade de se realizar uma triagem para separar aqueles que poderiam ser utilizados nos ensaios de tração perpendicular e quais seriam utilizados nos ensaios de inchamento e espessura. Melhor descrevendo: a porção central do corpo de prova apresentava a espessura real do corpo de prova, porém ao longo das bordas as fibras começaram a se desprender em ambas as faces superior e inferior, adquirindo uma textura frouxa. Portanto, aqueles em que sequer foi possível fazer as marcações dos pontos para se realizarem as medidas de espessura para os ensaios de inchamento e absorção de água em função do elevado desfibramento, foram utilizados para os ensaios de ligação interna (LI). Pois o contato sob pressão entre a superfície do corpo de prova e os aparatos utilizados no ensaio anulou o efeito do desfibramento. Tanto assim que a maioria dos rompimentos não ocorreram na linha de cola, isso ocorreu em apenas dois corpos de prova em cada tratamento (Tabela F, em anexo).

6.3.3 Modelos Matemáticos para Estimação de Propriedades Mecânicas

Com base nos dados das propriedades mecânicas dos painéis foram realizadas análises de regressão linear ($Y = a + bx$) para se verificar a possibilidade de se estimar as propriedades de rigidez e elasticidade a partir da metodologia não destrutiva de ondas de tensão. Na Tabela 8, os únicos modelos que não apresentaram significância estatística para um erro admissível de 5 % foram os de tração perpendicular (LI) para T₁₀.

TABELA 8 – Modelos matemáticos ($\alpha = 0,05$) desenvolvidos a partir de análises de regressão ($Y = a+bx$) para determinação dos Módulos de Elasticidade (E_M) e de Ruptura (f_m) e Ligação Interna (LI) através da velocidade de propagação de ondas (v_0) e Módulo de Elasticidade Dinâmico (E_d).

TRAT.	Modelo	F _{Ajustado}	R ² _{Ajustado}	Erro Padrão	Sig _{Ajustada}
T ₁₀	$E_M = -2.283,297+2,355.v_0$	17,596	0,494	169,567	0,001
	$f_m = -13,505+0,017.v_0$	6,609	0,228	2,038	0,019
	$LI = 0,00001+1,698.v_0$	0,001	-0,083	0,009	0,979
	$E_M = -398,268+8,984.E_d$	29,608	0,622	146,623	< 0,001
	$f_m = -0,901+0,074.E_d$	14,703	0,450	1,768	0,001
	$LI = 0,018+0,000001.E_d$	< 0,001*	-0,083*	0,009*	0,992*
T ₂₀	$E_M = -4.062,586+3,632.v_0$	30,022	0,625	123,019	< 0,001
	$f_m = -65,695+0,054.v_0$	65,802	0,773	1,242	< 0,001
	$LI = 0,071-96,825.v_0$	8,290	0,409	0,009	0,014
	$E_M = -332,429+8,076.E_d$	19,916	0,525	138,447	< 0,001
	$f_m = -10,522+0,124.E_d$	40,830	0,694	1,483	< 0,001
	$LI = -0,221+0,001.E_d$	6,065*	0,280*	0,042*	< 0,001*

* Não houve necessidade de ajuste.

6.3.4 Propriedades Físicas

Semelhante aos demais resultados, os valores de inchamento e absorção, tanto após 2 h como os de 24 h de imersão, também apresentaram diferenças estatisticamente significativas pelo teste da ANOVA (significâncias < 0,001 para $\alpha = 0,01$). Conforme apresentados na Tabela 9, os valores observados para as absorções e inchamentos foram menores para o T₂₀. Corroborando com o descrito por Rowell (2005) que os compósitos de

partículas apresentam menores efeitos de *spring-back* (alívio nas tensões internas do painel, observada pelo ganho em espessura) à medida que a sua densidade aumenta.

De maneira geral, a maior parte do inchamento e da absorção ocorreram nas primeiras duas horas de imersão. As espessuras de T_{10} mais que dobraram nas duas primeiras horas, enquanto que as de T_{20} quase dobraram após 24 h.

TABELA 9 – Valores médios percentuais de Inchamento (I) e Absorção (A) de após 2 e 24h de imersão em água.

Trat.	Nº	I_{2h} (%)	I_{24h} (%)	A_{2h} (%)	A_{24h} (%)
T_{10}	18	51,06 ± 11,28	64,91 ± 13,90	108,48 ± 28,56	128,15 ± 28,81
T_{20}	20	38,43 ± 6,17	45,15 ± 7,26	70,47 ± 5,69	83,14 ± 6,16

Os menores valores de inchamento observados para T_{20} confirmam a ocorrência de uma boa acomodação, compactação e adesão das fibras. Fato este coerente com o índice de Runkel medido por Rampazzo (2011) ao verificar que o índice para as fibras do coco verde estão entre 0,33 e 0,91 ($\bar{x} = 1,0 \pm 0,20$); sendo, portanto, classificadas de bom a muito bom. Esse índice é amplamente utilizado no setor de celulose e papel, pois avalia o grau de colapso das fibras. Associando esta informação com a temperatura de escoamento da lignina a 180 °C é possível entender que com valores mais elevados de densidade haverá um contato fibra-a-fibra maior. E, conseqüentemente, quanto maior o contato melhor será a adesão da lignina termodegradada com as superfícies das partículas, conferindo melhores propriedades mecânicas ao compósito.

Por outro lado, a NBR 14.810 exige um inchamento máximo de 8 % após duas horas de imersão. Então, nenhum dos tratamentos foi capaz de atender à norma, nem, mais uma vez, apresentaram valores próximos aos obtidos pelo Referencial Teórico (item 4.2.3).

Durante a realização dos ensaios de inchamento e absorção, desde o primeiro intervalo de duas horas, houve o desprendimento de uma substância que conferiu à água uma coloração vermelho-alaranjada (Figura 22). Aparentemente, quando fibras vegetais têm contato com água, há sempre uma perda de extrativos, algo observado por Ferraz et al. (2011) e Widyorini (2005). Este último realizou uma análise química e observou que havia lignina presente no meio aquoso residual desprendido durante a prensagem com vapor d'água para fibras de kenaf. Houvesse sido confirmada a presença de lignina na água utili-

zada nos ensaios de inchamento e espessura, diferentes concentrações desta indicariam, indiretamente, qual tratamento efetivamente ativou uma maior quantidade de lignina? Ferraz et al. (2012) observaram uma perda relativa de lignina nas fibras de coco após tratamento com água fria.



FIGURA 22 – Desprendimento de extrativos durante (Esquerda) e após realização (Direita) dos ensaios de Inchamento e Absorção de água.

6.3.4.1 Poder Calorífico Superior (PCS) e Carga de Incêndio Específica (q_{fi}) dos Painéis

Os painéis pertencentes a T_{10} apresentaram um PCS de 19,74 kJ/g ($\pm 0,11$) e os pertencentes a T_{20} de 19,68 ($\pm 0,21$). Segundo o teste da ANOVA ($\alpha = 0,01$) não houveram diferenças estatisticamente significativas para os PCSs entre os tratamentos (Tabela 10), portanto o valor médio observado para as partículas de coco apresentados na Tabela 11 é referente a média de seis ensaios, três pertencentes a cada tratamento.

TABELA 10 – Teste da ANOVA ($\alpha = 0,01$) para os valores de Poder Calorífico Superior (PCS) observados nos tratamentos T_{10} e T_{20} .

VARIÁVEL		Soma dos Quadrados	gl	Quadrado Médio	F	Sig.
PCS (kJ/g)	Entre grupos	0,005	1	0,005	0,193	0,683
	Dentro dos grupos	0,112	4	0,028		
	Total	0,117	5			

O PCS encontrado para os painéis foi próximo aos observados para algumas espécies madeireiras conhecidas por sua produtividade energética, como é o caso do *Sclerolobiu paniculatum* (vulgo carvoeiro), conforme descrito por Quirino et al. (2005) (Tabela 11). Ainda considerando o trabalho destes autores, nota-se que os PCSs da madeira de mu-

rici, ipê e jatobá também apresentam valores próximos aos dos compósitos desenvolvidos neste estudo.

TABELA 11 – Valores de Poder Calorífico Superior (PCS).

ESPÉCIE	OBS.	PCS (kJ/g)	FONTES:
<i>Cocos nucifera</i>	Mesocarpo	19,71	Este estudo.
<i>Byrsonima crassa</i>	Murici	20,03	
<i>Hymenaea coubaril</i>	Jatobá	20,07	QUIRINO et al. (2005)
<i>Sclerolobium paniculatum</i>	Carvoeiro	20,32	
<i>Tabebuia</i> spp.	Ipê	20,77	

Com base no demonstrado acima, foram calculados os valores de q_{fi} para ambos os tratamentos, pois as densidades entre os tratamentos são estaticamente distintas. Porém, como os valores de PCS não são estatisticamente diferentes, consequentemente os de PC_U também não são.

Portanto, uma vez determinado o valor de q_{fi} dos painéis de fibra de coco, torna-se possível calcular a representatividade dos compósitos na carga de incêndio e avaliar o risco de incêndio num determinado ambiente (Tabela 12), além de determinar a quantidade máxima que esses painéis podem ser armazenados de maneira segura. Exemplo: um Depósito de classe J-3 deve ter uma carga de incêndio entre 300 e 1.200MJ/m², segundo o Dec. N° 46.076 de 31 de agosto de 2001. Outros exemplos: uma floricultura classe C-1 teve apresentar uma carga máxima de 200MJ/m²; um laboratório classe D-4 de 300MJ/m²; uma biblioteca classe F-1 de 2.000MJ/m²; etc. (NT n°014/2007, CB-GO).

TABELA 12 – Valores de Carga de Incêndio (q_{fi}) calculados a partir dos valores de Poder Calorífico Útil a 12% de umidade ($PC_{12\%}$), Densidade aparente (ρ_a) e Espessura (Esp.) dos painéis produzidos pelos tratamentos T₁₀ e T₂₀.

Trat.	PC_{12%} (kJ/g)	ρ_a (g/cm³)	Esp. (mm)	q_{fi} (MJ/m²)
T ₁₀	17,01	0,77	14,96	196,46
T ₂₀	16,96	0,89	15,09	228,50

Portanto, os compósitos desenvolvidos por T₂₀ apresentam um risco relativo maior por apresentar um valor mais elevado de q_{fi} que T₁₀ (Tabela 12). Ambos pertencem à classe de Baixo Risco segundo o Dec. 46.076 (31/08/2001; GSP) (Tabela 13). Vale observar que o procedimento de cálculo para o q_{fi} desenvolvido neste estudo também permite determinar a densidade energética dos painéis (ρ_E). Entende-se esta como sendo a quantidade de energia desprendida por unidade de densidade, então para se determinar ρ_E basta dividir q_{fi} pela espessura do painel.

TABELA 13 – Classificação das Edificações e Áreas de Risco Quanto a Carga de Incêndio.

RISCO	Carga de Incêndio (MJ/m²)
Baixo	até 300 MJ/m ²
Médio	Entre 300 e 1.200 MJ/m ²
Alto	Acima de 1.200 MJ/m ²

FONTE: Dec. 46.076 31/08/2001.

Por fim, a simplicidade da metodologia de estimativa do q_{fi} através dos valores de PC_U, ρ_a e a espessura dos compósitos, considerando a relevância desta estimativa para a segurança de um estabelecimento, deixa-se a reflexão acerca da importância desta informação em estudos futuros que envolvam a confecção de painéis lignocelulósicos.

7 Conclusão

Com base nos resultados deste trabalho, pode-se concluir que:

- Apesar de os painéis não terem atendido aos requisitos da NBR 14.810 (2002), é possível produzir painéis através da auto-adesão das fibras de coco;
- O acréscimo de umidade nas partículas afetou positivamente as propriedades dos painéis na medida em que a compressibilidade das fibras aumentou, resultando em:
 - Uma maior densidade,
 - Melhores desempenhos físicos e mecânicos,
 - Uma menor expansão superficial após a prensagem, e
 - Uma maior padronização de compósitos.
- As Cargas de Incêndio Específicas para painéis produzidos são classificadas como de baixo risco de incêndio segundo o Decreto 46.076 de 31/08/2001.

8 Recomendações:

Considerando as observações feitas durante a execução deste trabalho, seguem algumas recomendações para estudos futuros:

- ❖ Que utilizarem fibras de coco:
 - Para o desenvolvimento de compósitos por auto-adesão:
 - Avaliar o(s) efeito(s):
 - ✓ Ao se utilizar exclusivamente fibras longas ou curtas.
 - ✓ Ao se utilizarem fibras de frutos mais maduros.
 - ✓ De se produzirem painéis:
 - Com ampla variedade de densidades.
 - De partículas orientadas.
 - ✓ De se lavar as fibras.
 - ✓ De se utilizar fibras lavadas disponíveis no mercado.
 - ✓ Da aplicação de retardantes de fogo.
 - Determinar a composição química da água utilizada nos ensaios de inchamento e absorção para avaliar a qualidade da adesão por meio da quantidade de lignina desprendida.
 - Avaliar a aceitação dos painéis a acabamentos.
 - Avaliar a trabalhabilidade dos painéis.
 - Avaliar a possibilidade e limitações de se produzirem painéis tridimensionais.
 - Determinar a composição química do pó presente em meio às fibras.
- ❖ No desenvolvimento ou estudo de compósitos lignocelulósicos:
 - Determinar a carga de incêndio específica (q_{fi}).
 - Descrever as características anatômicas do material utilizado.
 - Em estudos acerca das propriedades auto-adesivas:
 - ✓ Determinar o índice de Runkel do tecido utilizado.
 - ✓ Aplicação de tratamentos para a ativação química dos polímeros vegetais.
 - Determinar a composição química do material utilizado.
 - Utilizar espaçadores para uniformizar a espessura dos painéis.
- ❖ Não utilizar o mesmo corpo de prova mais de uma vez, ainda que sejam ensaios distintos.

9 Referências Bibliográficas

ABDUL KHALIL, H.P.S.; SITI ALWANI, M.; MOHD OMAR, A.K. Chemical Composition, Anatomy, Lignin Distribution, and Cell Wall Structure of Malaysian Plant Waste Fibers. **BioResources**. 1 (2), p. 220-232, 2006.

ANDO, M.; SATO, M. **Potential of finely milled powder of kenaf core as a binder**. The University of Tokyo, School of Agricultural and Life Sciences, June, 2008.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D 1037-99**, *Standard Test Methods for Evaluating Properties of Wood-Base and Particle Panel Materials*. West Conshohocken, PA, July, 1999.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D 790-03**, *Standard Test Methods for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials*. West Conshohocken, PA, April, 2003.

ARAGÃO, W.M.; SANTOS, V. DOS A.J.; ARAGÃO, F.B. Produção da Fibra de Cultivares de Coqueiro. **EMBRAPA**, Comunicado Técnico nº 35, Aracalú, SE, janeiro, 2006.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14.462**, *Exigências de Resistência ao Fogo de Elementos Construtivos de Edificações - Procedimento*. Rio de Janeiro, novembro, 2001, 14p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14.810-1**, *Chapas de Madeira Aglomerada – Parte 1: Terminologia*. Rio de Janeiro, março, 2002, 4p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14.810-2**, *Chapas de Madeira Aglomerada – Parte 2: Requisitos*. Rio de Janeiro, março, 2002, 3p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14.810-3**, *Chapas de Madeira Aglomerada – Parte 3: Métodos de ensaio*. Rio de Janeiro, março, 2002, 32p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8.633**, *Carvão Vegetal – Determinação do Poder Calorífico*. Outubro, p.13, 1984.

BOUJILA, J., LIMARE, A., JOLY, C., DOLE, P., Lignin Platicization to Improve Binderless Fiberboard Mechanical Properties. **Polymer Engineering and Science**, vol. 45, issue 6, p. 809-816, June, 2005.

DEUS, T. F. DE **Avaliação do uso de finos de bamboo *Guaduna magna* LONDOÑO & FILG e do *Eucalyptus grandis* (HILL) MAIDEIN para adesão de lâminas e produção de compensados de *Eucalyptus urograndis***. Departamento de Engenharia Florestal, Universidade de Brasília, 2009.

ESMERALDO, M.A.; BARRETO, A.C.H.; FREITAS J.E.B.; FECHINE, P.B.A.; SOMBRA, A.S.B.; CORRADINI, E.; MELE, G.; MAFEZZOLI, A.; MAZZETTO, S.E. Dwarf-green coconut fibers: a versatile natural renewable raw bioresource. Treatment, morphology, and physicochemical properties. **BioResources**. 5(4), p. 2478-2501, 2010.

FOOD AND AGRICULTURAL ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS. **FAO Stat 2011**, [http://faostat.fao.org/site/339/default.aspx] acessado em 29/01/2013 às 12:20.

FAKIROV, S.; BHATTACHARYYA, D. **Handbook of engineering biopolymers: homopolymers, blends and composites**. Carl Hanser Verlag, Munich, 2007. em [http://books.google.com.br/books?id=2KU3D_6GvtsC&pg=PA42&dq=Kulkarni+AG,+S atyanaraya-na+KG,+Sukumaran+K,+Rohatgi+PK.+Mechanical+behavior+of+coir+fibers+under+tensile+load.+J+Mater+Sci+1981;16:905+14.&hl=en&sa=X&ei=ZWEJUdbrJou09gS szIGwBQ&ved=0CC4Q6AEwAA#v=onepage&q&f=false] acessado em 25/01/2013 às 13:30.

FERRAZ, J.M.; DEL MENEZZI, C.H.S.; TEIXEIRA, D.E.; MARTINS, S.A. Effects of Treatment of Coir Fiber and Cement/Fiber Ratio on Properties of Cement-Bonded Composites. **BioResources**. 6(3), p. 3481-3492, 2011.

FERRAZ, J.M.; DEL MENEZZI, C.H.S.; SOUZA, M.R.; OKINO, E.Y.A.; MARTINS, S.A. Compatibility of Pretreated Coir Fibers (*Coco nucifera* L.) with Portland Cement to Produce Mineral Composites. **International Journal of Polymer Science**, 7 p., 2012

FERREIRA, D. **Viabilidade técnica da utilização de finos lignocelulósicos para a adesão entre lâminas e para produção de compensados de *Pinus oocarpa***. Departamento de Engenharia Florestal, Universidade de Brasília. 2009

FIGUEROA, M.J.M.; MORAES, P.D. DE COMPORTAMENTO DA MADEIRA A TEMPERATURAS ELEVADAS. **AMBIENTE CONSTRUÍDO**, v. 9, n. 4, p. 157-174, OUT/DEZ, PORTO ALEGRE, 2009.

FRIHART, C. R. **Wood Adhesion and Adhesives – Chapter 9**. USDA, Forest Service, Forest Products Laboratory, Madison, Wisconsin, 2006.

GOIÁS. **Norma Técnica n. 14 de 05/03/07, Carga de Incêndio nas Edificações e Áreas de Risco**, Corpo de Bombeiros Militar, Secretaria de Segurança Pública, Diretoria de Defesa Civil, Gerência de Segurança Contra Incêndio e Pânico, Estado de Goiás, 9 p., 2007.

HASHIM, R.; NADHARI, W.N.A.W.; SULAIMAN, O.; KAWAMURA, F.; HIZIROGLU, S.; SATO, M.; SUGIMOTO, T.; SENG, T.G.; TANAKA, R. Characterization of raw materials and manufactured binderless particleboard from oil palm biomass. **Materials and Design**. 32, p. 246-254, 2011.

HOUAISS, A.; VILLAR, M. DE S.; FRANCO, F.M. DE M. **Dicionário Houaiss da Língua Portuguesa**. Instituto Antônio Houaiss de Lexicografia e Banco de Dados da Língua Portuguesa S/C Ltda. Editora Objetiva, Rio de Janeiro, p. 2683, 2001.

HUNT, J. F.; AHMED, A.; FRIEDRICH, K. Effects of fiber processing on properties of fiber and fiberboard made from small-diameter lodgepole pine treetop. **Forests Products Journal**, vol. 58, nº 6, USDA, 2008.

HUNT, J. F.; SUPAN K. Binderless fiberboard: Comparison of fiber from recycled corrugated containers and refined small-diameter whole treetops. **Forests Products Journal**, vol. 56, nº 7/8, p. 69-74, USDA, 2006.

HUNT, J. F.; SUPAN K. Mechanical properties for a wet-processed fiberboard made from small-diameter lodgepole pine treetop material. **Forests Products Journal**, vol. 55, nº 5, p. 82-87, USDA, 2005.

IBACH, R.E. **Chapter 19: Specialty Treatments: Plasticizing Wood**. in **Wood Handbook – Wood as an engineering material**. General Technical Report FPL-GTR-190. Madison, WI: US, Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory. 508 p. 2010.

JOARDDER, M.U.H.; ISLAM, M.R.; BEG, M. Pyrolysis of coconut shell for bio-oil. In: **International Conference on Mechanical Engineering 2011 (ICME 2011)**. Bangladesh University of Engineering and Technology, Dhaka, December, 2011.

JOLY, A.B.; GEMTCHUJNIKOV, I. **Botânica: introdução à taxonomia vegetal**. São Paulo, Biblioteca Universitária, 13ª edição, 777 p., 2002.

LORENZI, H. **Árvores Brasileiras: manual de identificação e cultivo de plantas arbóreas do Brasil. Volume 01**. Nova Odessa (SP), Instituto Plantarum, 4ª edição, 2002.

MARTINS, C.R. & JÚNIOR, L.A. DE J. **Evolução da produção de coco no Brasil e o comércio internacional: panorama 2010**. Aracaju – Embrapa Tabuleiros Costeiros, 28 p., 2011.

MUNAWAR, S.S.; UMEMURA, K.; KAWAI, S. Characterization of the morphological, physical, and mechanical properties of seven plant fibers. **Journal of Wood Science**. 53, p. 108-113, 2007.

QUIRINO, W.F.; VALE, A.T. DO; ANDRADE, A.P.A. DE; ABREU, V.L.S.; AZEVEDO, A.C. DOS S. Poder Calorífico da Madeira e de Materiais Lingnocelulósicos. **Revista Madeira**, nº 89, p. 100-106, abril, 2005.

RAHMAN, M.M.; KHAN, M.A. Surface treatment of coir (*Cocos nucifera*) fibers and its influence on the fibers' physic-mechanical properties. **Composites Science and Technology**. 67, p. 2369-2376, 2007.

RAMPAZZO, A. **Caracterização físico-química e anatômica da fibra de coco verde (*Cocos nucifera*)**. Departamento de Engenharia Florestal, Universidade de Brasília, 2011.

SANTA CATARINA. **Informativo Técnico nº 003 18/09/06**, *Exemplos de Dimensionamento – Carga de Incêndio*. Corpo de Bombeiros Militar, Secretaria da Segurança Pública e Defesa do Cidadão, Diretoria de Atividades Técnicas, Estado de Santa Catarina, 2006, 7 p.

SÃO PAULO. **Instrução Técnica Nº 08/2011**, *Resistência ao Fogo dos Elementos de Construção*. Corpo de Bombeiros Militar, Secretaria de Estado dos Negócios da Segurança Pública, Polícia Militar do Estado de São Paulo, p. 192-202, 2011.

SÃO PAULO. **Decreto Nº 45.076 de 31 de agosto de 2001**. *Regulamento de Segurança contra incêndio das edificações e áreas de risco*. Governo do Estado de São Paulo, 37 p, 2001.

SCHAFFER, E.L. Effect of Pyrolytic Temperature on the Longitudinal Strength of Dry Douglas Fir. **Journal of Testing and Evaluation**. v. 1, n. 4, p. 319-329, 1973. APUD: FIGUEIROA, M.J.M.; MORAES, P.D. DE Comportamento da madeira a temperaturas elevadas. **Ambiente Construído**, v. 9, n. 4, p. 157-174, out/dez, Porto Alegre, 2009.

STANDARDS NEW ZEALAND. **SNZ PAS 4.509:2008**, *Firefighting Water Supplies Code of Practice*. Publicly Available Specification: New Zealand Fire Service, 2008, 75p.

TOMCZAK, F.; SYDENSTRICKER, T.H.D.; SATYNARAYANA, K.G. Studies on lignocellulosic fibers of Brazil. Part II: Morphology and properties of Brazilian coconut fibers. **Composites**, Part A 38, p 1710-1721, 2007.

TRIOLA, M.F. **Introdução à Estatística**. Editora LTC, 9ª Ed., 2005.

VAN DAM, J.E.G.; OEVER, M.J.A. VAN DEN; KEIJSERS, E.R.P. (2004a) Process for production of high density high performance binderless boards from whole coconut husk. **Industrial Crops and Products**, 20 (2004) 97-101.

VAN DAM, J.E.G.; OEVER, M.J.A. VAN DEN; TEUNISSEN, W.; KEIJSERS, E.R.P.; PERALTA, A.G. (2004b) Process for production of high density/high performance binderless boards from whole coconut husk. Part 1: Lignin as intrinsic thermosetting binder resin. **Industrial Crops and Products**, 19 (2004) 207-216.

VAN DAM, J.E.G.; OEVER, M.J.A. VAN DEN; KEIJSERS, E.R.P.; PUTTEN, J.C. VAN DER; ANAYRON, C.; JOSOL, F.; PERALTA, A.G. Process for production of high density/high performance binderless boards from whole coconut husk. Part 2: Coconut husk morphology, composition and properties. **Industrial Crops and Products**, 24 (2006) 96-104.

VELÁSQUEZ, J.A., FERRANDO, F., SALVADÓ, J., Binderless Fiberboard from Steam Exploded Miscanthus sinensis: the effect of a grinding process. **Springer - Verlog**, Holz als Rohund Werkstoff, vol. 60, p. 197-302, 2002.

VIDAL, W.N. & VIDAL, M.R.R. **Botânica – organográfica; quadros sinóticos ilustrados de fanerógamas**. Viçosa UFV, 4ª edição rev.ampl., 124 p., 2003.

WANSANOOK, K., SATO, M. Study on Manufacture and Properties of Bamboo-Chip Binderless Board. **VIII World Bamboo Congress Proceedings**, vol. 8, p. 125-134, 2009.

WIDYORINI, R. **Self-bonding characterization of non-wood lignocellulosic materials.** Kyoto University, Japan, 2005.

ZALOK, E. **Validation of Methodologies to Determine Fire Load for Use in Structural Fire Protection.** The Fire Protection Research Foudation, Quincy, MA, USA, May, 2011.

10 Anexos

10.1 Análises Estatísticas e Dados Complementares

TABELA A – Teste da ANOVA ($\alpha = 0,01$) para os valores médios entre os tratamentos T₁₀ e T₂₀ para as propriedades de Densidade aparente (ρ_a), Módulo de Elasticidade (E_M), Módulo de Ruptura (f_m), velocidade de propagação de ondas (v_0) e Módulo de Elasticidade Dinâmico (E_d), Inchamento (I), Absorção de Água (A), Ligação Interna (LI) e ASTM 790-03 (σ_f).

VARIÁVEL		Soma dos Quadrados	gl	Quadrado Médio	F	Sig.
ρ_a (g/cm ³)	Entre grupos	0,145	1	0,145	85,952	0,000
	Dentro dos grupos	0,064	38	0,002		
	Total	0,209	39			
E_M (MPa)	Entre grupos	2.567.590,778	1	2.567.590,778	55,746	0,000
	Dentro dos grupos	1.750.232,760	38	46.058,757		
	Total	4.317.823,538	39			
f_m (MPa)	Entre grupos	237,559	1	237,559	38,987	0,000
	Dentro dos grupos	231,545	38	6,093		
	Total	469,104	39			
v_0 (m/s)	Entre grupos	320.451,171	1	320.451,171	96,885	0,000
	Dentro dos grupos	125.686,838	38	3.307,548		
	Total	446.138,009	39			
E_d (MPa)	Entre grupos	41.442,694	1	41.442,694	110,181	0,000
	Dentro dos grupos	14.293,046	38	376,133		
	Total	55.735,740	39			
I_{2h} (%)	Entre grupos	1.511,519	1	1.511,519	18,844	0,000
	Dentro dos grupos	2.887,663	36	80,213		
	Total	4.399,181	37			
I_{24h} (%)	Entre grupos	3.699,488	1	3.699,488	31,094	0,000
	Dentro dos grupos	4.283,172	36	118,977		
	Total	7.982,660	37			
A_{2h} (%)	Entre grupos	13.691,482	1	13.691,482	34,028	0,000
	Dentro dos grupos	14.484,777	36	402,355		
	Total	28.176,280	37			
A_{24h} (%)	Entre grupos	19.192,027	1	19.192,027	46,569	0,000
	Dentro dos grupos	14.836,446	36	412,123		
	Total	34.028,473	37			
LI (MPa)	Entre grupos	0,019	1	0,019	15,251	0,001
	Dentro dos grupos	0,033	26	0,001		
	Total	0,052	27			
σ_f (MPa)	Entre grupos	227,729	1	227,729	37,227	0,000
	Dentro dos grupos	232,459	38	6,117		
	Total	460,189	39			

TABELA B – Teste de normalidade Shapiro-Wilk ($\alpha = 0,01$) para os valores observados de Densidade aparente (ρ_a), Módulo de Elasticidade (E_M), Módulo de Ruptura (f_m), velocidade de propagação de ondas (v_0) e Módulo de Elasticidade Dinâmico (E_d).

Trat.	Propr.	Estatística	gl	Sig.
T ₁₀	ρ_a (g/cm ³)	0,977	20	0,896
	E_M (MPa)	0,966	20	0,662
	f_m (MPa)	0,930	20	0,155
	v_0 (m/s)	0,967	20	0,682
	E_d (MPa)	0,977	20	0,897
T ₂₀	ρ_a (g/cm ³)	0,939	20	0,233
	E_M (MPa)	0,928	20	0,142
	f_m (MPa)	0,894	20	0,032
	v_0 (m/s)	0,936	20	0,203
	E_d (MPa)	0,926	20	0,130

TABELA C – Teste da ANOVA ($\alpha = 0,05$) para os valores de Espessuras (Esp.) observados nos tratamentos T₁₀ e T₂₀.

VARIÁVEL		Soma dos Quadrados	gl	Quadrado Médio	F	Sig.
Esp. (mm)	Entre grupos	0,170	1	0,170	0,110	0,742
	Dentro dos grupos	58,675	38	1,544		
	Total	58,846	39			

TABELA D – Teste de normalidade Shapiro-Wilk ($\alpha = 0,05$) para os valores observados para as Espessuras (Esp.) nos tratamentos T₁₀ e T₂₀.

Propr.	Trat.	Estatística	gl	Sig.
Esp. (mm)	T ₁₀	0,798	20	0,001
	T ₂₀	0,961	20	0,564

TABELA E – Teste t ($\alpha = 0,05$) para amostras emparelhadas dos valores de f_m (MPa) e σ_f (MPa) observados nos tratamentos T₁₀ e T₂₀.

TRAT.		t	gl	Sig.*
T ₁₀	$f_m - \sigma_f$	1,658	19	0,114
T ₂₀	$f_m - \sigma_f$	2,998	19	0,007

* Significância para duas extremidades.

TABELA F – Valores de Densidade aparente (ρ_a), Módulo de Elasticidade (E_M), Módulo de Ruptura (f_m), velocidade de propagação de ondas (v_0) e Módulo de Elasticidade Dinâmico (E_d), Inchamento (I), Absorção de Água (A), Ligação Interna (LI) e ASTM 790-03 (σ_f) para cada painel de cada tratamento.

		CARACTERÍSTICA										
		ρ_a (g/cm ³)	E_M (MPa)	f_m (MPa)	v_0 (m/s)	E_d (MPa)	I_{2h} (%)	I_{24h} (%)	A_{2h} (%)	A_{24h} (%)	LI (MPa)	σ_f (MPa)
T₁₀ – Painel 1	A-I	0,76	643,77	7,58	1.282,05	127,55	49,50	62,16	94,30	117,01		7,49
	A											
	A-II						35,89	50,32	86,20	107,62		
	B-I	0,79	930,47	10,04	1.336,30	143,70	46,42	59,96	94,68	114,99		9,87
	B											
	B-II						38,83	50,07	91,34	110,87		
	C-I	0,81	992,53	9,86	1.343,30	148,88	44,61	57,87	85,30	105,04		9,68
	C											
	C-II						34,99	46,15	82,32	103,31		
	D-I	0,86	1.112,02	13,11	1.401,47	172,73	52,06	64,64	93,01	113,15		12,98
	D											
	D-II						38,09	47,39	74,46	91,59		
E-I	0,84	1.103,76	12,70	1.373,00	162,07	53,98	64,27	97,75	80,79		12,41	
E												
E-II						41,68	51,43	80,79	101,49			
T₁₀ – Painel 2	A-I	0,66	411,91	5,03	1.142,13	88,06					0,013	4,90
	A											
	A-II										0,005	
	B-I	0,76	631,71	7,51	1.225,32	116,04	66,72	86,24	154,05	178,74		7,31
	B											
	B-II						61,99	77,71	130,49	152,57		
	C-I	0,82	956,76	10,72	1.295,90	139,94	65,22	80,47	153,13	169,84		10,52
	C											
	C-II						62,22	73,38	115,41	134,62		
	D-I	0,81	759,14	10,58	1.292,18	138,09					0,021	10,43
	D											
	D-II										0,014	
E-I	0,74	616,87	7,40	1.228,67	113,72	71,21	90,50	161,54	184,13		7,29	
E												
E-II						59,93	82,70	14,24	164,86			
T₁₀ – Painel 3	A-I	0,75	584,99	5,85	1.283,88	125,57					0,014	5,81
	A											
	A-II										0,026	
	B-I	0,79	688,76	7,30	1.329,39	143,28					*	7,08
	B											
	B-II										0,011	
	C-I	0,78	675,74	7,24	1.340,28	142,25	47,65	61,69	103,42	117,50		6,83
	C											
	C-II						48,05	61,36	104,47	120,07		
	D-I	0,77	744,40	6,60	1.328,41	138,38						6,51
	D											
	D-II											
E-I	0,74	603,90	6,25	1.293,10	125,92					0,019	6,14	
E												
E-II										0,027		

*Rompimento na linha de cola.

TABELA F – Valores de Densidade aparente (ρ_a), Módulo de Elasticidade (E_M), Módulo de Ruptura (f_m), velocidade de propagação de ondas (v_0) e Módulo de Elasticidade Dinâmico (E_d), Inchamento (I), Absorção de Água (A), Ligação Interna (LI) e ASTM 790-03 (σ_f) para cada painel de cada tratamento (*continuação*).

		CARACTERÍSTICA										
		ρ_a (g/cm ³)	E_M (MPa)	f_m (MPa)	v_0 (m/s)	E_d (MPa)	I_{2h} (%)	I_{24h} (%)	A_{2h} (%)	A_{24h} (%)	LI (MPa)	σ_f (MPa)
T₁₀ – Painel 4	A-I										0,006	
	A	0,72	160,97	7,17	1.201,60	105,49						8,27
	A-II										*	
	B-I										0,009	
	B	0,82	774,56	10,92	1.301,52	140,91						11,25
	B-II										0,028	
	C-I										0,021	
	C	0,77	906,94	9,77	1.215,40	116,03						9,96
	C-II										0,032	
	D-I											
	D	0,77	812,80	11,02	1.229,51	119,40						10,40
	D-II											
E-I												
E	0,69	530,60	7,39	1.165,05	95,45						6,22	
E-II												
T₂₀ – Painel 6	A-I										0,071	
	A	0,96	1.497,55	16,91	1.539,78	232,89						17,14
	A-II										0,145	
	B-I						34,23	38,79	54,88	68,62		
	B	0,93	1.573,83	20,50	1.534,53	224,47						19,86
	B-II						29,84	34,46	65,76	78,19		
	C-I						31,70	38,49	61,79	73,98		
	C	0,91	1.388,13	16,33	1510,07	211,70						16,55
	C-II						29,55	35,10	71,86	82,56		
	D-I						31,23	37,04	71,87	85,61		
	D	0,87	1.205,72	13,66	1.480,26	193,49						13,68
	D-II						30,55	36,64	63,78	74,54		
E-I										0,059		
E	0,86	1.435,54	10,92	1.426,31	177,88						10,16	
E-II										0,154		
T₂₀ – Painel 7	A-I										0,024	
	A	0,87	1.077,62	12,15	1.405,15	175,55						11,41
	A-II										0,075	
	B-I						42,48	50,68	77,19	90,06		
	B	0,89	1.129,33	11,19	1.411,76	181,69						11,97
	B-II						40,08	47,19	77,72	94,18		
	C-I						44,95	52,65	73,38	86,58		
	C	0,92	1.288,54	11,75	1.470,59	203,96						15,14
	C-II						38,69	44,08	76,75	89,52		
	D-I										0,156	
	D	0,92	1.095,07	15,71	1.463,41	200,73						12,50
	D-II										0,038	
E-I												
E	0,90	1.084,82	12,89	1.418,44	183,74						10,80	
E-II												

*Rompimento na linha de cola.

TABELA F – Valores de Densidade aparente (ρ_a), Módulo de Elasticidade (E_M), Módulo de Ruptura (f_m), velocidade de propagação de ondas (v_0) e Módulo de Elasticidade Dinâmico (E_d), Inchamento (I), Absorção de Água (A), Ligação Interna (LI) e ASTM 790-03 (σ_f) para cada painel de cada tratamento (*continuação*).

		CARACTERÍSTICA										
		ρ_a (g/cm ³)	E_M (MPa)	f_m (MPa)	v_0 (m/s)	E_d (MPa)	I_{2h} (%)	I_{24h} (%)	A_{2h} (%)	A_{24h} (%)	LI (MPa)	σ_f (MPa)
T ₁₀ – Painel 8	A-I											
	A	0,95	1.137,31	10,79	1.464,61	207,74						11,49
	A-II											
	B-I										0,052	
	B	0,95	1.620,68	11,97	1.491,30	214,71						14,66
	B-II										0,064	
	C-I						34,64	40,47	69,08	80,70		
	C	0,93	1.430,68	15,28	1.497,50	212,69						14,70
	C-II						41,53	46,75	70,54	82,34		
	D-I						32,76	39,29	71,77	86,44		
	D	0,87	1.198,74	14,77	1.441,15	184,60						13,55
	D-II						40,83	46,07	77,39	90,29		
E-I										*		
E	0,87	986,67	14,00	1.415,09	178,68						10,98	
E-II										*		
T ₂₀ – Painel 9	A-I						50,41	58,89	72,43	85,40		
	A	0,93	1.057,38	11,22	1.448,11	199,10						11,05
	A-II						46,71	55,84	67,72	80,06		
	B-I										0,023	
	B	0,92	1.207,27	13,05	1.465,80	200,88						12,95
	B-II										0,081	
	C-I						42,25	50,68	47,14	86,50		
	C	0,93	1.329,64	16,18	1.491,30	210,81						15,96
	C-II						41,30	48,97	68,21	80,92		
	D-I										0,020	
	D	0,86	991,39	11,36	1.404,06	173,36						11,28
	D-II										0,015	
E-I						43,77	52,25	71,39	83,79			
E	0,88	1.040,96	10,79	1.412,87	179,28						10,61	
E-II						41,03	48,57	72,22	82,57			

*Rompimento na linha de cola.

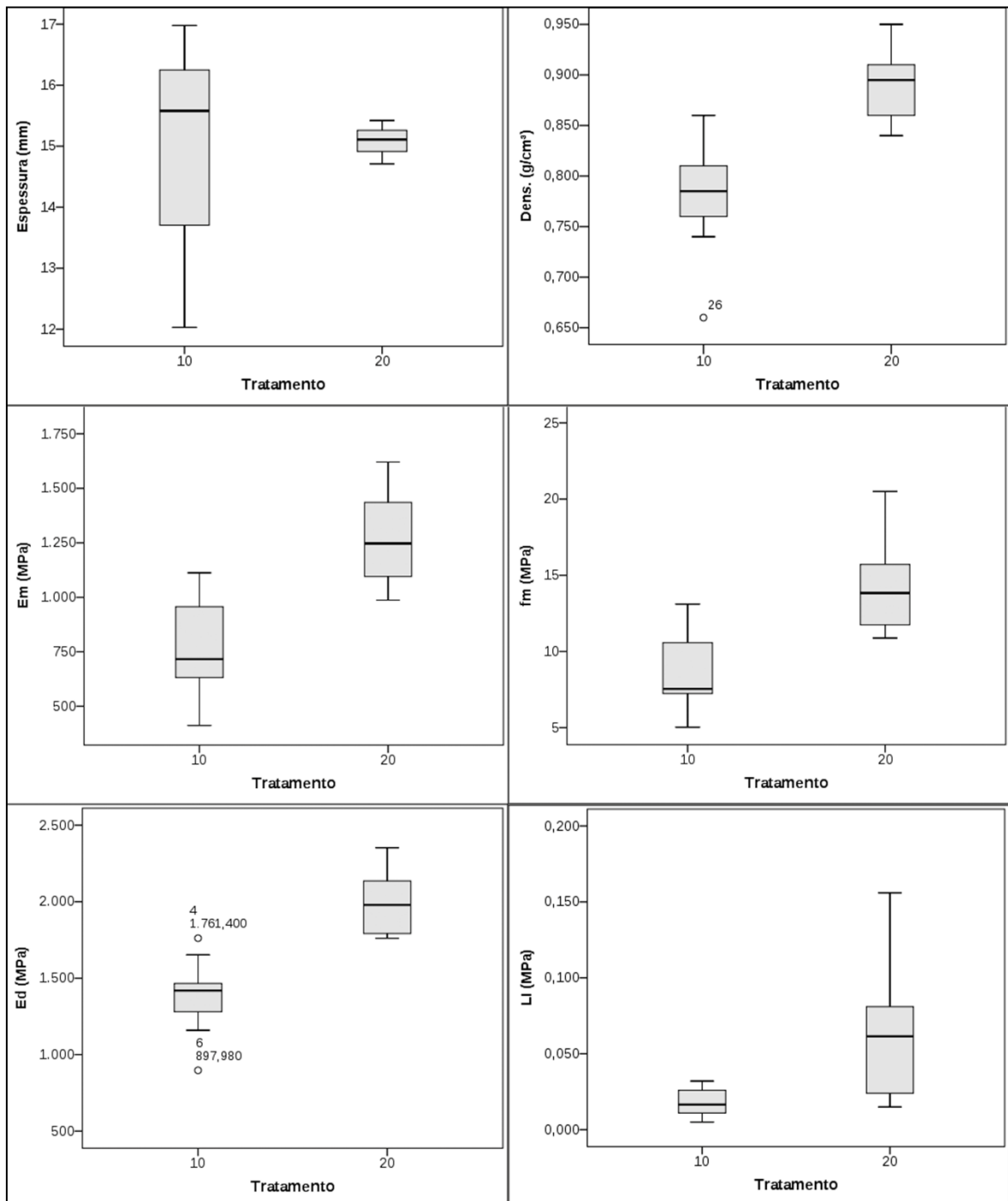


FIGURA A – Caixa e Bigode das características dos painéis produzidos pelos tratamentos T10 e T20 para as variáveis de Espessura, Densidade aparente (Dens.), Módulo de Elasticidade (Em), Módulo de Ruptura (fm), Módulo de Elasticidade Dinâmica (Ed) e Ligação Interna (LI).

QUADRO A – Ramo e folhas da distribuição dos diâmetros das partículas em classes de 0,1 mm.

Diâmetro das Partículas (mm)		
Classes	Centésimo de milímetro	<i>fr</i>
0,0	233334444445555666666667777788888999999	41
0,1	00000000000111112222222222223333333334444445555555566667788899	63
0,2	00000011112222233333344445566777778899	38
0,3	011112222233333444444556667889999	33
0,4	12234488	8
0,5	003468	6
0,6	58	2
0,7	0124	4
0,8		0
0,9	6	1
1,0		0
1,1	4	1
1,2		0
1,3	6	1
1,4		0
1,5	9	1
1,6		0
1,7	0	1
TOTAL		200

QUADRO B – Ramo e folhas da distribuição dos comprimentos das partículas em classes de 10 mm.

Comprimento das Partículas (mm)		
Dez.	Unidade	<i>fr</i>
0	5556666666677777888888888889999999999	39
1	000000000011111111122222222222222233333333333444445555555666667778888999	79
2	00000011112222222223334444455555555666778999	47
3	000111111233555699	17
4	00167899	8
5	002449	6
6	15	2
7	9	1
8	6	1
Total		200