

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

**Caracterização tecnológica de painéis de fibras da madeira de eucalipto, *Eucalyptus grandis*, e de partículas do bagaço do colmo de cana-de-açúcar, *Saccharum sp***

**Ugo Leandro Belini**

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

**Piracicaba  
2012**

**Ugo Leandro Belini  
Engenheiro Florestal**

**Caracterização tecnológica de painéis de fibras da madeira de eucalipto,  
*Eucalyptus grandis*, e de partículas do bagaço do colmo de cana-de-açúcar,  
*Saccharum sp***

versão revisada de acordo com a resolução CoPGr 6018 de 2011

**Orientador:  
Prof. Dr. MARIO TOMAZELLO FILHO  
Co - Orientador:  
Prof. Dr. JOSÉ LUIS P. C. LOUZADA**

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

**Piracicaba  
2012**



**Dedico**

***Com gratidão, aos meus pais Edno e Shirley.***

***E, em especial, à Marta.***



## AGRADECIMENTOS

O período de curso do Doutorado, que decorreu efetivamente entre os anos de 2009 a 2011, foi marcado por grandes mudanças e uma transição de atividades profissionais do setor privado para a academia. Queria brevemente citar entidades, alguns amigos, colegas e instituições que muito contribuíram nesta etapa e dizer que não quero, em função da ordem em que aparecem listados, indicar maior ou menor relevância. Apenas que as citei de forma livre e com sincera gratidão.

Em especial a *Deus*, por toda a força e saúde.

A minha *Família*, aos eternos laços de amor e companheirismo presentes em todas as caminhadas.

Professor *Mario Tomazello Filho*: à amizade e longo tempo de atividades conjuntas, pronta orientação e competência para todos os desenvolvimentos deste trabalho.

Pesquisador *José Luis P. C. Lousada*: á amizade, co-orientação, análises estatísticas e ótimo convívio durante o período em Portugal.

A *Fundação de Amparo a Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP)*, devido ao fornecimento de bolsa Doutorado e reserva técnica.

A *Duratex S.A.*, na pessoa do Engenheiro *José Reinaldo Sartori Astolphi*, amigo e Gerente de Desenvolvimento de Painéis, pela disponibilidade da excelente e completa estrutura fabril. Aos Técnicos *Paulo Milton R. de Lima* e *Djai Artioli Munhoz* pelo fundamental apoio na confecção e auxílio na análise dos painéis. Aos amigos das Unidades Agudos e Botucatu. Serei sempre grato.

À *Usina Açúcareira São Manuel S.A.*, pelo fornecimento do bagaço de cana-de-açúcar.

A *Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES)*, pelo apoio financeiro do Programa CAPES-GRICES para a bolsa sanduíche no exterior.

Pesquisadores *Gilles Chaix*, *Paulo R.G. Hein*, *Marie-France Thevenon*, *Nicolas Lemenager* e *Christine Baudassé* do *CIRAD* em Montpellier, França: ótima receptividade, grande profissionalismo e disponibilização de estrutura durante os bioensaios e análises NIR.

Pesquisador *José Xavier* e Professor *José Morais*, da *UTAD* em Portugal: trabalho conjunto e grande apoio computacional nos ensaios óticos.

Professores *Adriano Wagner Ballarin* e *Hernando Alfonso de Lara Palma* da *UNESP*; Professor *Geraldo Bortoletto Jr.* da *ESALQ*; Professor *Lourival Marin Mendes* da *UFLA*: importantes contribuições para melhoria deste trabalho.

MSc. *Guilherme Biz*: grande auxílio nas análises estatísticas.

Pesquisador *José Carlos Rodrigues*, do *IICT* em Lisboa: à amizade e auxílio nas análises NIR.

A *EMBRAPA-CNPDIA*, na pessoa do Dr. *Paulo R. O. Lasso*, pela sempre pronta disponibilidade para uso do microtomógrafo de raios X.

Aos amigos da *UTAD*, Professora *Maria Emília*, *César Gomes*, Professora *Maria João* e *Armindo Gonçalves* pelo ótimo convívio, e ao Laboratório de Microscopia Eletrônica, nas pessoas da Dra. *Lisete Fernandes* e Professora *Tereza Maria*, pela obtenção das imagens MEV.

Aos Professores da Área de Tecnologia de Produtos Florestais do LCF/ESALQ/USP, em especial *Ivaldo Pontes Jankowsky* e *José Otávio Brito*, e a *Catarina Germuts* e *Luis E. Facco*.

Aos amigos do Laboratório, em especial à Técnica *Maria Ap. Bermudez*, ao *Matheus P. Chagas*, *Dr. Carlos R. Sette Jr.*, *Dr. Claudio Lisi*, *Angel T. B. Ferreira*, *Moises S. Lobão*, *Vinícius R. de Castro*, *Victor H. Moutinho*, *Cláudio Roberto*, *Marco Arizapana*, *Boris Villa*, *Priscila Geroto*, *Daniel Costa*, *Alisson Rangel*, *Mariana*, *Alejandro*, e do Programa de Pós Graduação em Recursos Florestais do LCF/ESALQ/USP, em especial *Ariel*, *Saly*, *Javier* e *Paula*.

## SUMÁRIO

RESUMO.....	11
ABSTRACT.....	13
LISTA DE FIGURAS.....	15
LISTA DE TABELAS.....	21
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS.....	23
1 INTRODUÇÃO .....	25
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	33
2.1 Produção e características do bagaço do colmo de cana-de-açúcar.....	33
2.2 Oferta da biomassa de cana-de-açúcar.....	35
2.3 O eucalipto e o bagaço de cana-de-açúcar para a confecção de painéis de fibra e partícula.....	36
2.3.1 O painel de fibra (MDF).....	36
2.3.2 O painel de partícula (aglomerado ou MDP).....	37
2.3.3 O bagaço de cana-de-açúcar.....	38
2.4 A importância dos componentes celulares na confecção de painéis de fibra.....	38
2.5 Histórico do desenvolvimento dos painéis de madeira.....	39
2.6 Produtos alternativos a madeira para confecção de painéis reconstituídos.....	41
2.7 Aplicações e aspectos mercadológicos dos painéis MDF.....	44
2.8 Insumos utilizados na confecção de painéis MDF.....	46
2.8.1 Resina.....	46
2.8.1.1 Formaldeído.....	47
2.8.2 Emulsão de parafina.....	48
2.9 Propriedades tecnológicas de painéis MDF e MDP de resíduos vegetais..	48
2.10 Densitometria de raios X aplicada à análises de painéis.....	51
2.11 Espectroscopia no infravermelho próximo (NIR) aplicada à análise de painéis.....	51
2.12 Análises óticas/deflectometria aplicada à análise de painéis.....	52
2.13 Microtomografia de raios X (microCT) aplicada à análise de painéis.....	54
2.14 Microscopia eletrônica de varredura (MEV) aplicada à análise de painéis	55



3 MATERIAL E MÉTODOS.....	57
3.1 Coleta do bagaço de cana-de-açúcar, da madeira e das fibras de eucalipto.....	57
3.1.1 Local e coleta do bagaço de cana-de-açúcar.....	57
3.1.2 Local de coleta da madeira e fibras de eucalipto.....	58
3.2 Caracterização dos colmos de cana-de-açúcar, da madeira de eucalipto e de sua mistura em diferentes porcentagens.....	58
3.2.1 Caracterização anatômica dos colmos de cana-de-açúcar.....	58
3.2.2 Caracterização anatômica da madeira de eucalipto.....	58
3.2.3 Caracterização macroscópica da mistura de partículas de cana-de-açúcar e fibras de eucalipto em diferentes porcentagens.....	58
3.2.4 Análises complementares dos colmos de cana-de-açúcar, da madeira de eucalipto e de sua mistura em diferentes porcentagens.....	59
3.2.4.1 Microscopia eletrônica de varredura (MEV).....	59
3.2.4.2 Espectroscopia no infravermelho próximo (NIR).....	59
3.3 Confeção dos painéis de fibras de eucalipto e partículas de cana-de-açúcar.....	60
3.3.1 Delineamento experimental e tratamentos dos painéis.....	60
3.3.2 Preparo das amostras de bagaço de cana-de-açúcar.....	61
3.3.2.1 Classificação granulométrica.....	61
3.3.3 Preparo das amostras de fibras da madeira de eucalipto.....	63
3.3.4 Mistura das fibras e partículas, insumos e prensagem do colchão para a confecção dos painéis.....	63
3.3.5 Insumos utilizados na confecção dos painéis.....	67
3.4 Caracterização dos painéis de fibras de eucalipto e partículas de cana-de-açúcar.....	69
3.4.1 Caracterização dos perfis de densidade por atenuação de raios X.....	69
3.4.1.1 Densitômetro GreCon DA-X.....	69
3.4.1.2 Densitômetro Joyce LoebI.....	70
3.4.2 Caracterização por espectroscopia no infravermelho próximo (NIR).....	72
3.4.3 Caracterização das propriedades físico-mecânicas.....	73
3.4.3.1 Caracterização por análises óticas (deflectometria).....	76
3.4.4 Caracterização química (teor de sílica e de formol livre).....	79

3.4.5 Caracterização da durabilidade biológica (bioensaios).....	80
3.4.5.1 Resistência ao ataque de cupins.....	80
3.4.5.2 Resistência ao ataque de fungos.....	81
3.4.6 Caracterização anatômica através de microscopia eletrônica de varredura (MEV).....	82
3.4.7 Caracterização por microtomografia de raios X.....	83
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	87
4.1 Caracterização das fibras de eucalipto, partículas do bagaço de cana-de-açúcar e da mistura de ambas.....	87
4.1.1 Caracterização macroscópica dos elementos fibrosos e misturas praticadas.....	87
4.1.2 Classificação granulométrica do bagaço de cana-de-açúcar.....	91
4.1.3 Caracterização anatômica através de microscopia eletrônica de varredura (MEV).....	92
4.1.4 Caracterização por espectroscopia no infravermelho próximo (NIR).....	96
4.2 Caracterização dos painéis de fibras de eucalipto e partículas do bagaço de cana-de-açúcar.....	99
4.2.1 Caracterização dos perfis de densidade por atenuação de raios X.....	99
4.2.1.1 Densitômetro GreCon DA-X.....	99
4.2.1.2 Densitômetro Joyce LoebL.....	106
4.2.2 Caracterização dos painéis por espectroscopia no infravermelho próximo (NIR).....	110
4.2.3 Caracterização das propriedades físico-mecânicas.....	112
4.2.3.1 Etapa A.....	112
4.2.3.2 Etapa B.....	117
4.2.3.3 Influência da dosagem de resina.....	124
4.2.3.4 Caracterização dos painéis por análise ótica (deflectometria).....	126
4.2.4 Caracterização química.....	128
4.2.4.1 Teores de sílica.....	128
4.2.4.2 Teores de formol livre.....	130
4.2.5 Caracterização dos painéis quanto a durabilidade biológica (bioensaios).....	132
4.2.5.1 Resistência ao ataque de cupins.....	132

4.2.5.2 Resistência ao ataque de fungos.....	135
4.2.6 Caracterização anatômica dos painéis através de microscopia eletrônica de varredura (MEV).....	137
4.2.7 Caracterização dos painéis por microtomografia de raios X (microCT)....	142
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	147
6 RECOMENDAÇÕES.....	151
REFERÊNCIAS.....	153

## RESUMO

### **Caracterização tecnológica de painéis de fibras da madeira de eucalipto, *Eucalyptus grandis*, e de partículas do bagaço do colmo de cana-de-açúcar, *Saccharum sp***

O aumento do consumo da madeira e de seus produtos, como os painéis de madeira, estimula o desenvolvimento de tecnologia de produtos que utilizam os insumos caracterizados como resíduos. Neste aspecto, o país reúne vantagens competitivas, pela extensa área de plantações de eucalipto de alta produtividade, detém a primeira posição na produção de cana-de-açúcar e possui um parque industrial com avançada tecnologia de produção de painéis de fibras e de partículas. Com este contexto, o presente trabalho teve como principal objetivo a confecção e a caracterização tecnológica de painéis de fibras de madeira de eucalipto, *Eucalyptus grandis* e de partículas do bagaço do colmo de cana-de-açúcar, *Saccharum sp*. Os ensaios laboratoriais compreenderam, inicialmente, a caracterização macroscópica das matérias primas e suas misturas, bem como classificação granulométrica do bagaço de cana-de-açúcar. Em seguida, foram estabelecidas 2 etapas referentes ao processo de confecção dos painéis, denominadas etapa A (0-100% de bagaço de cana-de-açúcar, com variações de 25%; 14% de resina UF) e etapa B (0-25% de bagaço de cana-de-açúcar, com variações de 5%; 13 e 16% de resina UF). A caracterização tecnológica dos painéis compreendeu a análise da sua morfologia (microscopia MEV, microtomografia de raios X/microCT), densitometria de raios X, propriedades físicas (densidade, inchamento, absorção e umidade), mecânicas (MOR, MOE, resistências à trações perpendicular e superficial, arrancamento de parafuso); análises óticas por deflectometria, química (espectroscopia NIR, teor de formol livre e sílica) e durabilidade natural (bioensaios de fungos xilófagos e cupins). Os resultados da avaliação morfológica indicaram diferenças da estrutura anatômica das matérias primas e de granulometria das partículas de bagaço de cana-de-açúcar. A avaliação morfológica dos painéis evidenciou, através da microCT, a homogeneidade da matriz fibrosa, cuja composição anatômica foi diferenciada através do MEV. Na caracterização das propriedades físico-mecânicas, os perfis de densidade aparente dos painéis, típicos de painéis de fibras, indicaram a influência da matéria prima e sua mistura. Ainda, verificou-se uma redução das propriedades mecânicas, notadamente MOR, MOE e resistência à tração perpendicular, dos painéis confeccionados com mais de 50% de partículas do bagaço de cana-de-açúcar; quanto à resina, 16% resultou em melhor desempenho tecnológico em relação à 13%. Os valores de MOE dos painéis foram similares aos obtidos pela aplicação da técnica ótica de deflectometria. O aumento percentual de partículas do bagaço de cana-de-açúcar nos painéis resultou em redução do teor de formol livre e no aumento do teor de sílica. A aplicação da metodologia NIR permitiu a diferenciação das fibras da madeira de eucalipto e das partículas de bagaço de cana-de-açúcar e seus percentuais praticados. Nos bioensaios os painéis (etapa B) não apresentaram diferenças significativas quanto à resistência ao ataque de fungos e cupins. Os resultados permitem concluir que os painéis de fibras de eucalipto e partículas de bagaço de cana-de-açúcar, como matéria prima alternativa e em percentuais entre 5-25%, apresentaram propriedades tecnológicas que atendem às normas, indicando o potencial da utilização desta biomassa para produtos de maior valor agregado.

Palavras-chave: Painéis MDF; Painéis MDP; Compósitos, Anatomia de painéis; *Eucalyptus grandis*; *Saccharum SP*; Biomassa; Bagaço de cana-de-açúcar; Propriedades físico-mecânicas; Fibra; Chapa de fibra de média densidade; Chapa de partícula de média densidade

## ABSTRACT

### **Technological characterization of panelboards from eucalyptus wood fibers, *Eucalyptus grandis*, and stalk particles of sugarcane bagasse, *Saccharum sp***

The increased consumption of wood and its products, such as wood panels, stimulates the development of technology for products that use inputs characterized as waste. In this respect, Brazil has competitive advantages regarding the large area of high-yield eucalyptus crops; Brazil is the world's major sugarcane producer and has an industrial sector with advanced technology for fiberboards and particleboards production. Therefore, this study aimed to develop the manufacture and technological characterization of wood fibers from eucalyptus, *Eucalyptus grandis*, and stalk particles of sugarcane bagasse, *Saccharum sp*. Laboratory analyses included, initially, the macroscopic characterization of raw materials and their mixtures as well as sorting granules of crushed sugarcane bagasse. Then, two steps were established for the panel-making process, called phase A (0-100% of sugarcane bagasse, with variations of 25%, 14% UF resin) and phase B (0 - 25% of sugarcane bagasse, with variations of 5%, 13 and 16% UF resin). The technological characterization of the panels comprised the morphology analysis (SEM microscopy, X-ray microtomography / microCT), X-ray densitometry, physical properties (density, swelling in thickness, absorption and moisture content), mechanical (MOR, MOE, internal bond, surface resistance and axial withdrawal of screw); optical analysis by deflectometry, chemical (NIR spectroscopy, free formaldehyde content of sand content) and natural durability (bioassays of fungi and termites). The results indicated morphological differences of anatomical structure of raw materials and particle size of sugarcane bagasse. The morphological evaluation of the panels showed, through the microCT, the homogeneity of the fibrous matrix, whose anatomical composition was different through SEM. In the characterization of physical-mechanical properties, the density profiles of the panels, typical of fiberboards, indicated the influence of raw materials and their mixture. Still, there was a reduction of mechanical properties, notably MOR, MOE and internal bond to the panels made with more than 50% of sugarcane bagasse particles; regarding the resin, 16% resulted in better technological performance compared to 13%. The MOE values of the panels were similar to those obtained by applying the deflectometry technique. The percentage of sugarcane bagasse particles in the panels resulted in reduction of the level of free formaldehyde and increase of the sand content. The use of the NIR methodology allowed the differentiation of eucalyptus wood fibers and particles of sugarcane and their percentage applied. In bioassays, the panels (step B) showed no significant differences in resistance to fungi and termites. The results indicate that the panels of eucalyptus fibers and particles of sugarcane bagasse, as an alternative raw material and at percentages between 5-25% showed technological properties that meet the standards, indicating the potential use of this biomass for products with higher value added.

Keywords: MDF panels; MDP panels; Composites; Panel anatomy; *Eucalyptus grandis*; Biomass; *Saccharum sp*; Sugarcane bagasse; Physical and mechanical properties; Fiber; Particle; Medium density fiberboard; Medium density particleboard



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 -	Área cultivada de cana-de-açúcar no estado de São Paulo (adap. Aguiar, 2010).....	26
Figura 2 -	Distribuição das indústrias de painéis de fibras e partículas (adap. ABIPA, 2011).....	26
Figura 3 -	Áreas cultivadas e distribuição das plantações de eucalipto (adap. ABRAF, 2010).....	27
Figura 4 -	Demanda de mercado e capacidade de produção de painéis MDF no Brasil, entre 1997 e 2013 (adap. Duratex, 2008).....	45
Figura 5 -	Princípios da técnica de deflectometria (adap. Kim, 2008).....	53
Figura 6 -	Princípio de funcionamento e componentes básicos do microCT, indicando o tubo de raios X, posicionamento da amostra na câmara de irradiação, intensificador de imagem e projeção da imagem da estrutura anatômica coletada em câmera CCD (adap. Pereira, 2009).....	55
Figura 7 -	Carregamento e disposição do bagaço no pátio de estocagem (A, B, C); aspecto das partículas parcialmente degradadas no interior da pilha (D).....	57
Figura 8 -	(A) Equipamento Produtest para a classificação morfológica do bagaço de cana-de-açúcar; (B) Peneiras, aberturas (mm) e imagens ilustrativas da classificação morfológica das frações de bagaço de cana-de-açúcar.....	62
Figura 9 -	Etapas da preparação do colchão de fibras + partículas. (A) mistura da resina + emulsão de parafina; (B) aspecto externo da encoladeira; (C) detalhes dos bicos aspersores por ar comprimido; (D) imagem interna da encoladeira, indicando agitadores; (E) aspecto das fibras + partículas já aglutinadas anteriormente à formação do colchão.....	64
Figura 10 -	Etapas da preparação para prensagem do colchão. (A) fibras + partículas encoladas dispostas em caixa de formação; (B) retirada de ar interno ao colchão (pré-prensagem); (C) imagem do colchão formado anteriormente à prensagem; (D) colocação de termopar para controle e monitoramento do ciclo de	



	prensagem; (E) aspecto da prensa laboratorial utilizada.....	65
Figura 11 -	Ilustração do ciclo e variáveis utilizadas durante prensagem dos painéis.....	66
Figura 12 -	Etapas da obtenção das partículas de bagaço e fibras de eucalipto, sua mistura e confecção dos painéis.....	68
Figura 13 -	Obtenção do perfil de densidade dos painéis por densitometria de raios X. (A) densitômetro de raios X GreCon DA-X; (B e C) corte dos corpos de prova dos painéis; (D) corpos de prova dispostos no porta-amostra; (E) deslocamento do suporte para a câmara de leitura; (F) perfil e valores de densidade aparente do painel (adap. Belini et. al, 2009).....	71
Figura 14 -	Parâmetros quantitativos de densidade avaliados no perfil densitométrico (adap. Belini et al., 2009).....	71
Figura 15 -	Obtenção do perfil. (A) corte em serra dupla circular; (B) aspecto das amostras após corte; (C) disposição das amostras para obtenção de película; (D) equipamento para irradiação das amostras; (E) densitômetro Joyce Loeb; (F) saída dos valores de densidade ótica em fita perfurada e traçador de gráficos.....	72
Figura 16 -	Dimensões da amostra de painel e orientação para a obtenção dos espectros NIR (adap. Belini et al., 2011).....	73
Figura 17 -	Painéis: amostragem dos corpos de prova para os ensaios de qualidade tecnológica.....	74
Figura 18 -	Obtenção de superfície refletiva. (A) painéis após lixamento; (B) painéis após aplicação de massa selante e lixamento; (C) retirada da placa de vidro após cura da resina epóxi; (D) painel com superfície altamente refletiva.....	78
Figura 19 -	Sistema de ensaio foto-mecânico. (A) painel fixado em 3 pontos (setas); (B) grade fixada em suporte vertical com sistema de iluminação; (C) célula de carga e pontos de aplicação; (D) orifício no painel de suporte da grade e câmera para captação de imagens.....	79

Figura 20 - (A) microtomógrafo Skyscan 1172; (B) amostra disposta no porta amostra; (C) Aspecto e dimensões de amostra utilizada na obtenção de imagens da estrutura anatômica. (D) Imagem da seção transversal da estrutura anatômica e indicação das linhas de referência (azul e verde) para a projeção dos planos longitudinais.....	84
Figura 21 - Processo de obtenção dos painéis e análises propostas em cada etapa.....	85
Figura 22 - Aspecto visual e ampliação dos componentes celulares de eucalipto e de cana-de-açúcar em suas diversas misturas. (A) 100% eucalipto; (B) 5% cana e 95% eucalipto; (C) 10% cana e 95% eucalipto; (D) 15% cana e 85 % eucalipto; (E) 20% cana e 80% eucalipto; (F) 25% cana e 75% eucalipto; (G) 50% cana e 50% eucalipto e (H) 100% cana.....	89
Figura 23 - Componentes celulares do colmo de cana-de-açúcar: (A) feixe de fibras (a), parênquima (b) e epiderme (c) (150 x); (B) detalhe de parênquima (300 x); (C) elemento de vaso rompido (600 x) e (D) células de parênquima (600 x).....	94
Figura 24 - Componentes celulares do eucalipto. (A) aspecto das fibras após desfibramento (250 x); (B) fibra separada na lamela média (2000 x); (C) feixe de fibras (a) com células de parênquima radial (b) (500 x) e (D) elemento de vaso (a) (600 x).....	95
Figura 25 - Mistura de elementos de cana-de-açúcar e eucalipto. (A) fibras de eucalipto (a) e parênquima de cana-de-açúcar (b) (200 x); (B) região da epiderme da cana-de-açúcar (a) entre fibras de eucalipto (400 x); (C) elemento de vaso da cana-de-açúcar rompido (800 x) e (D) aglomerado de células de parênquima da cana-de-açúcar (150 x).....	96
Figura 26 - Espectros de absorvância, obtidos com comprimento de onda entre 12000 a 4000 $\text{cm}^{-1}$ , de diferentes percentuais de mistura entre fibras de eucalipto e partículas do bagaço de cana-de-açúcar.....	98

- Figura 27 - Espectros de absorvância, obtidos com comprimento de onda entre 12000 a 4000  $\text{cm}^{-1}$ , de partículas do bagaço de cana-de-açúcar após classificação morfológica em diferentes peneiras.... 98
- Figura 28 - Perfis de densidade ao longo da espessura dos painéis MDF, etapa A, com 14% resina. (A) 100% eucalipto, (B) 25% cana-de-açúcar e 75% eucalipto, (C) 50% cana-de-açúcar e 50% eucalipto; (D) 75% cana-de-açúcar e 25% eucalipto; (E) 100% cana-de-açúcar..... 102
- Figura 29 - Imagens de raios X digital dos painéis, etapa A, com 14% resina. (A) 100% eucalipto, (B) 25% cana-de-açúcar e 75% eucalipto, (C) 50% cana-de-açúcar e 50% eucalipto; (D) 75% cana-de-açúcar e 25% eucalipto; (E) 100% cana-de-açúcar. Setas indicam cristais, possivelmente formados por agrupamento de parênquima recoberto por adesivo..... 103
- Figura 30 - Perfis de densidade, etapa B, com 13% resina. (A) 100% eucalipto, (B) 5% cana-de-açúcar e 95% eucalipto, (C) 10% cana-de-açúcar e 90% eucalipto; (D) 15% cana-de-açúcar e 85% eucalipto; (E) 20% cana-de-açúcar e 80% eucalipto, (F) 25% cana-de-açúcar e 75% eucalipto..... 104
- Figura 31 - Perfis de densidade, etapa B, com 16% resina. (A) 100% eucalipto, (B) 5% cana-de-açúcar e 95% eucalipto, (C) 10% cana-de-açúcar e 90% eucalipto, (D) 15% cana-de-açúcar e 85% eucalipto; (E) 20% cana-de-açúcar e 80% eucalipto, (F) 25% cana-de-açúcar e 75% eucalipto..... 105
- Figura 32 - Perfis, densitômetro Joyce LoebI, com 13% resina. (A) 100% eucalipto, (B) 5% cana-de-açúcar e 95% eucalipto, (C) 10% cana-de-açúcar e 90% eucalipto, (D) 15% cana-de-açúcar e 85% eucalipto, (E) 20% cana-de-açúcar e 80% eucalipto, (F) 25% cana-de-açúcar e 75% eucalipto..... 108
- Figura 33 - Perfis, densitômetro Joyce LoebI, com 16% resina. (A) 100% eucalipto, (B) 5% cana-de-açúcar e 95% eucalipto, (C) 10% cana-de-açúcar e 90% eucalipto, (D) 15% cana-de-açúcar e 85% eucalipto, (E) 20% cana-de-açúcar e 80% eucalipto, (F)

	25% cana-de-açúcar e 75% eucalipto.....	109
Figura 34 -	Espectros NIR obtidos dos painéis sólidos, com comprimento de onda entre 9.000 a 4.000 $\text{cm}^{-1}$ .....	112
Figura 35 -	Gráfico da dispersão dimensional das amostras com diferentes percentuais de partículas de bagaço de cana-de-açúcar.....	112
Figura 36 -	(A) Partícula de $\text{SiO}_2$ identificada (a) em imagem MEV (500 x) e (B) análise química elementar indicativa de pico de concentração de $\text{Si}$ .....	129
Figura 37 -	Painéis submetidos ao ensaio com cupins. (A) início da avaliação, (B) após 4 semanas e (C) após 8 semanas de exposição.....	134
Figura 38 -	Aspecto do preparo para inoculação (A) e dos painéis submetidos ao ataque do fungo <i>Pleurotus ostreatus</i> após 16 semanas (B, C).....	137
Figura 39 -	Etapa A, aspecto da região interna de painel. (A) e (B) painel confeccionado com 100% fibras de eucalipto (100 e 800 x); (C) e (D) painel confeccionado com 50% fibras de eucalipto/50% partículas de bagaço de cana-de-açúcar (100 e 800 x); (E) e (F) painel confeccionado com 100% partículas de bagaço de cana-de-açúcar (100 e 800 x).....	139
Figura 40 -	Etapa B. 13% UF. Aspecto visual da região interna do painel. (A) e (B) 100% eucalipto (150 e 600 x); (C) e (D) 25% cana/75% eucalipto (150 e 600 x); Aspecto superficial do painel. (E) e (F) 100% eucalipto (150 e 600 x); (G) e (H) 25% cana/75% eucalipto (150 e 600 x).....	140
Figura 41 -	Etapa B. 16% UF. Aspecto visual da região interna do painel. (A) e (B) 100% eucalipto (100 e 800 x); (C) e (D) 25% cana/75% eucalipto (100 e 600 x); Aspecto superficial do painel. (E) e (F) 100% eucalipto (150 e 800 x); (G) e (H) 25% cana/75% eucalipto (150 e 600 x).....	141
Figura 42 -	Imagens microCT de painéis. (A, A', A'') planos transversal e longitudinais radial e tangencial. Painel de (I) 100% de fibras de madeira de eucalipto; (II) 25% de bagaço de cana-de-açúcar e	

75% de fibras de eucalipto; (III) 50% de bagaço de cana-de-açúcar e 50% de fibras de eucalipto; (IV) 75% de bagaço de cana-de-açúcar e 25% de fibras de eucalipto; (V) 100% de bagaço de cana-de-açúcar..... 145

Figura 43 - Imagens de painéis MDF e MDP obtidas por microCT. (A) região superficial e (B) região central de painel MDF comercial; (C) camada externa e (D) camada interna de painel MDP comercial..... 146

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 -	Composição química do bagaço de cana-de-açúcar (adap. CTC, 2011; Klock et al., 2005).....	33
Tabela 2 -	Produção, área e biomassa de cana-de-açúcar de 2005-2030 (adap. BRASIL, 2007).....	36
Tabela 3 -	Empresas, localização e capacidade de produção de painéis MDF no Brasil (adap. Duratex, 2008).....	45
Tabela 4 -	Tratamentos propostos para a confecção dos painéis nas etapas A e B.....	61
Tabela 5 -	Características da resina uréia formol (UF) utilizada na confecção dos painéis.....	67
Tabela 6 -	Características da emulsão de parafina utilizada na confecção dos painéis.....	68
Tabela 7 -	Classificação e indicação da severidade do ataque de cupins (adap. AFNOR EN 117, 2005).....	81
Tabela 8 -	Classificação granulométrica das partículas de bagaço de cana-de-açúcar, em peneiras vibratórias de abertura 12,7-2,0 mm e valores médios de retenção (%).....	92
Tabela 9 -	Classificação granulométrica das partículas de bagaço de cana-de-açúcar, em peneiras vibratórias de aberturas 1,0-0,297 mm e valores médios de retenção (%).....	92
Tabela 10 -	Densidades máximas, médias e mínimas dos perfis obtidos no densitômetro GreCon, por etapa e tratamento.....	106
Tabela 11 -	Densidades máximas, médias e mínimas dos perfis obtidos no densitômetro Joyce Loebel, por etapa e tratamento.....	110
Tabela 12 -	Propriedades tecnológicas dos painéis, etapa A, dosagem UF em 14%.....	116
Tabela 13 -	Correlação de Pearson entre as variáveis físico-mecânicas dos painéis, etapa A.....	117
Tabela 14 -	Propriedades tecnológicas dos painéis, etapa B, dosagem UF em 13%.....	122
Tabela 15 -	Propriedades tecnológicas dos painéis, etapa B, dosagem UF em 16%.....	123

Tabela 16 -	Variáveis tecnológicas dos painéis obtidos nos dois diferentes percentuais de resina UF praticados: 13% e 16%.....	126
Tabela 17 -	Variáveis dos tratamentos, valores de MOE obtidos através de determinação clássica (NBR 15316) e por deflectometria, e comparativo % entre os métodos.....	128
Tabela 18 -	Teor de sílica (%) nos painéis de diferentes tratamentos, etapas A e B.....	130
Tabela 19 -	Teor de formol livre (mg/100g) nos painéis de diferentes tratamentos, etapas A e B.....	132
Tabela 20 -	Resultado do ataque de cupins da espécie <i>Reticulitermes santonensis</i> nos painéis: perda de massa (%) e taxa de sobrevivência (%) e intensidade do ataque.....	134
Tabela 21 -	Resultado da degradação por fungos da espécie <i>Pleurotus ostreatus</i> nos painéis: perda de massa (%) e índice de sensibilidade a degradação (ISD).....	136

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

<b>ABIMOVEL</b>	Associação Brasileira das Indústrias do Mobiliário
<b>ABIPA</b>	Associação Brasileira da Indústria de Painéis de Madeira
<b>ABNT</b>	Associação Brasileira de Normas Técnicas
<b>ABRAF</b>	Associação Brasileira de Produtores de Florestas Plantadas
<b>AFNOR</b>	Association Française de Normalisation
<b>BNDES</b>	Banco Nacional do Desenvolvimento Econômico e Social
<b>BP</b>	Baixa Pressão
<b>BS</b>	Brithish Standards
<b>CARB</b>	California Air Resource Board
<b>CCD</b>	Charged Coupled Device
<b>CE</b>	Camada Externa do Painel MDP
<b>CI</b>	Camada Interna do Painel MDP
<b>CIRAD</b>	Centre de Coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement
<b>CNPDIA</b>	Centro Nacional de Pesquisa e Desenvolvimento em Instrumentação Agropecuária
<b>CTC</b>	Centro de Tecnologia Canavieira
<b>DIN</b>	Deutsches Institut für Normung
<b>EDS</b>	Energy Dispersive Spectroscopy
<b>EMBRAPA</b>	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
<b>EN</b>	European Standard
<b>ESALQ</b>	Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”
<b>EUA</b>	Estados Unidos da América
<b>FAO</b>	Organização das Nações Unidas para Agricultura e Alimentação
<b>FF</b>	Finish Foil
<b>HDF</b>	High Density Fiberboard
<b>HB</b>	Hardboard
<b>IB</b>	Internal Bond
<b>IICT</b>	Instituto de Investigação Científica Tropical
<b>INPE</b>	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
<b>IPT</b>	Instituto de Pesquisas Tecnológicas
<b>ISD</b>	Índice de Sensibilidade a Degradação



<b>ISO</b>	International Organization for Standardization
<b>LCF</b>	Departamento de Ciências Florestais da ESALQ/USP
<b>MAPA</b>	Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento
<b>MDF</b>	Medium Density Fiberboard
<b>MDP</b>	Medium Density Particleboard
<b>MEV</b>	Microscopia Eletrônica de Varredura
<b>MicroCT</b>	Microtomografia de Raios X
<b>MME</b>	Ministério das Minas e Energia
<b>NBR</b>	Norma Técnica Brasileira
<b>NIR</b>	Near Infrared Spectroscopy
<b>OMS</b>	Organização Mundial de Saúde
<b>OSB</b>	Oriented Strand Board
<b>PCA</b>	Análise de Componentes Principais
<b>PLS</b>	Mínimos Quadrados Parciais
<b>RMSECV</b>	Raiz Média do Erro Padrão
<b>R<sup>2</sup><sub>cv</sub></b>	Coefficiente de Determinação entre os Valores Mensurados e o Modelo
<b>SRμCT</b>	Radiação Síncrotron Baseada em Microtomografia de Raios X
<b>UF</b>	Resina Uréia Formol ou Ureia Formaldeído
<b>USP</b>	Universidade de São Paulo
<b>UNICA</b>	União da Indústria de Cana-de-Açúcar
<b>UTAD</b>	Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro

#### **LISTA DE ABREVIATURAS (PROPRIEDADES DOS PAINÉIS)**

<b>E</b>	espessura (mm)
<b>D</b>	densidade (kg m <sup>-3</sup> )
<b>MOR</b>	módulo de ruptura (N mm <sup>-2</sup> )
<b>MOE</b>	módulo de elasticidade (N mm <sup>-2</sup> )
<b>RTP</b>	resistência a tração perpendicular (N mm <sup>-2</sup> )
<b>RTS</b>	resistência a tração superficial (N mm <sup>-2</sup> )
<b>RAPT</b>	resistência ao arrancamento de parafuso no topo (kgf)
<b>RAPF</b>	resistência ao arrancamento de parafuso na face (kgf)
<b>I</b>	inchamento (%)
<b>A</b>	absorção (%)

## 1 INTRODUÇÃO

### **Porque o bagaço da cana-de-açúcar ?**

O Brasil é o maior produtor mundial de açúcar de cana-de-açúcar, espécie cultivada em cerca de 8,3 milhões de hectares na sua região centro-sul (INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS - INPE, 2010), sendo 5,3 milhões de hectares localizados no estado de São Paulo, o que compreende cerca de 21,3% de sua área total (Figura 1).

A partir de 2000 verifica-se um aumento anual de 35 milhões de toneladas na produção de cana-de-açúcar (CENTRO DE TECNOLOGIA CANAVIEIRA - CTC, 2011), com uma produção de 570 milhões de toneladas e 160 milhões de toneladas de bagaço na safra 08/09 (UNIÃO DA INDÚSTRIA DE CANA-DE-AÇÚCAR - UNICA, 2010).

O bagaço de cana-de-açúcar é gerado no processo de esmagamento dos colmos de cana-de-açúcar nas moendas industriais, gerando energia elétrica através da sua queima, apresentando significativa importância econômica para as usinas (BANCO NACIONAL DE DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO E SOCIAL - BNDES, 1995; GOMES, 2006; SANCHOTENE, 2007; COPERSUCAR, 2009).

O excedente do bagaço produzido nas usinas de açúcar e de álcool (OLIVEIRA, 2006; SANCHOTENE, 2007) é indicado como matéria-prima para inúmeras aplicações, como a confecção de painéis MDF (Medium Density Fiberboard), segundo ROSSEL (2006), nas regiões tropicais incluindo o Brasil (HOAREAU et al., 2006). Saliente-se que a região centro-sul do país concentra a quase totalidade das indústrias de painéis reconstituídos de fibras e partículas, conforme Figura 2 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DE PAINÉIS DE MADEIRA - ABIPA, 2011).

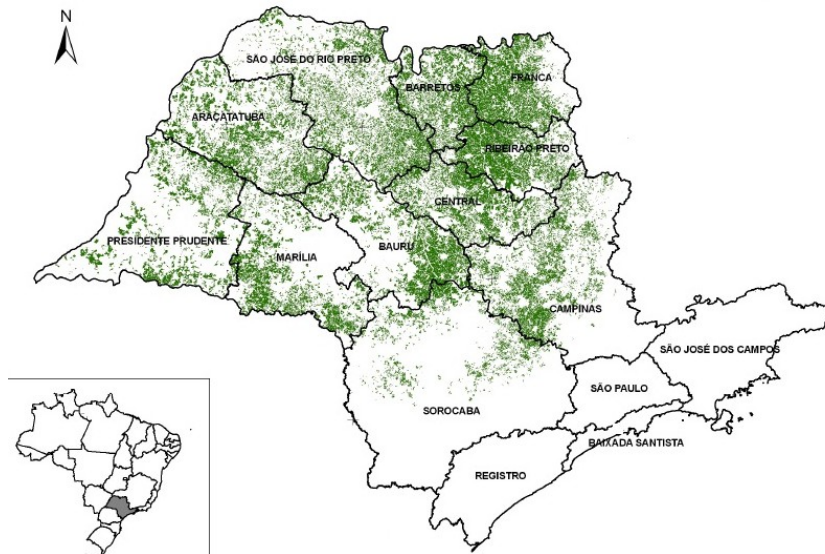


Figura 1 - Área cultivada de cana-de-açúcar no estado de São Paulo (adap. Aguiar, 2010)

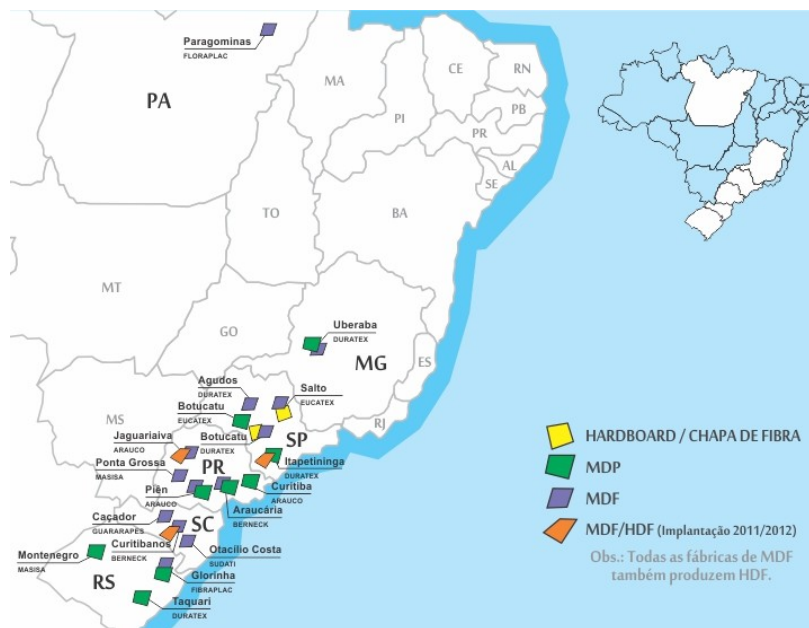


Figura 2 – Distribuição das indústrias de painéis de fibras e partículas (adap. ABIPA, 2011)

### Porque o *Eucalyptus sp* ?

As plantações de eucalipto ocupam 4,5 milhões de hectares (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE PRODUTORES DE FLORESTAS PLANTADAS - ABRAF, 2010) na maioria dos estados brasileiros (Figura 3) destacando os da região centro-sul, com um crescimento de 41,1% no período 2004-2009. O aumento do incremento anual na produção de madeira, a redução do ciclo de rotação, a alta produtividade e a expansão dos investimentos pelas empresas de segmentos que utilizam sua

madeira como matéria prima (ABRAF, 2010) resultam em estratégica competitividade no setor florestal brasileiro (FAO, 2000).

A utilização da madeira de eucalipto para a produção de painéis MDF apresenta vantagens em relação a de pinus, como (i) menor ciclo de corte das árvores, (ii) maior rendimento na conversão volume de madeira/volume de painel MDF, pela maior densidade da madeira, (iii) utilização integral das toras, com a casca, removida quando da utilização do pinus, (iv) fibras de menor comprimento proporcionando melhor qualidade pós-usinagem do painel, para uma mesma energia de desfibramento aplicada (BELINI, 2007). As desvantagens remetem a painéis de coloração mais escura, com maior abrasividade e pior desempenho em inchamento comparativamente a painéis MDF confeccionados com madeira de pinus, e que podem ser minimizadas através do melhoramento genético.



Figura 3 - Áreas cultivadas e distribuição das plantações de eucalipto (adap. ABRAF, 2010)

### **Porque não o *Pinus sp* ?**

A área plantada com pinus vem decrescendo de forma gradual no Brasil, desde 2007, com queda de cerca de 37 mil hectares em 2009, em relação a 2008, o que vem motivando empresas produtoras de painéis de fibras e partículas a promoverem sua substituição, ou em alguns casos mistura, com espécies de

eucalipto, mesmo considerando que a maioria de seus plantios concentram-se nos estados das regiões sul e sudeste, com ótima logística de distribuição de madeira às indústrias de painéis reconstituídos.

A pequena queda observada na área de florestas plantadas com pinus é explicada, em parte, pela decisão de algumas empresas do setor em substituir gradativamente florestas com pinus por eucalipto. Adicionalmente, parte desta redução da área plantada total com pinus é atribuída aos efeitos da crise econômica global uma vez que este grupo de espécies está fortemente associada à indústria madeireira, a qual sofreu redução no nível de produção e exportação, principalmente aquela voltada ao setor da construção civil nos Estados Unidos (ABRAF, 2010).

Ainda, plantações de pinus apresentam a tendência de direcionamento da madeira para produtos considerados mais nobres do que o processamento para a geração de cavacos, como por exemplo madeira serrada, lâminas faqueadas e confecção de móveis.

### **Porque painéis reconstituídos ?**

O setor de painéis reconstituídos de madeira investiu cerca de US\$ 1,2 bilhões, nos últimos anos, na instalação de novas unidades industriais, que proporcionarão um aumento da capacidade instalada de 8,5 milhões de m<sup>3</sup> (base 2009) para 10,3 milhões de m<sup>3</sup>/ano em 2012, sendo 5,1 milhões de m<sup>3</sup> de painéis MDP (Medium Density Particleboard) e 4,8 milhões de m<sup>3</sup> de painéis MDF.

Os investimentos em tecnologia e automação resultaram na implantação de parques industriais modernos, atualização tecnológica das plantas existentes, de linhas contínuas de produção e de novos processos de impressão, de impregnação, de revestimento e pintura (ABIPA, 2011).

O Brasil é um dos países mais avançados na fabricação de painéis de madeira reconstituída e com maior número de fábricas de última geração, com uma linha com produção de 2500 m<sup>3</sup> de painéis MDF/dia, considerada uma das maiores do mundo.

O parque industrial brasileiro de painéis MDF e MDP está fixado em sua grande maioria nos estados das regiões sul e sudeste do Brasil, de acordo com a Figura 2, e que conforme indicado coincide com as regiões de maior disponibilidade em madeira oriunda de florestas plantadas de pinus e eucalipto. Esta região contempla, também, os maiores pólos moveleiros do Brasil, destacando-se os de

Bento Gonçalves (RS); São Bento do Sul (SC); Arapongas (PR); Mirassol, Votuporanga e São Paulo (SP); Ubá (MG) e Linhares (ES), conforme Buainain e Batalha (2007), e que utilizam amplamente este dois tipos de painéis reconstituídos.

### **A confluência entre os setores**

A área das plantações de eucalipto e de cana-de-açúcar e a localização das indústrias de painéis reconstituídos (Figuras 1, 2 e 3) indicam uma logística de produção e de utilização das matérias primas para a confecção de painéis com partículas de bagaço de cana-de-açúcar em sua matriz fibrosa, convergindo em interesse de 3 setores de destaque no agronegócio e indústria brasileira, sendo eles a cadeia produtiva da cana-de-açúcar, de eucalipto e a indústria de painéis reconstituídos. Desta forma, pode-se tornar estratégico para o país o desenvolvimento de tecnologia para a aplicação do bagaço da cana-de-açúcar como matéria prima fibrosa na fabricação de painéis de fibras e partículas, minimizando a demanda por madeira de eucalipto e, principalmente, proporcionando agregação de valor e uso a um insumo destinado à queima para a geração de energia.

No entanto, é reconhecida a importante e crescente utilização do bagaço de cana-de-açúcar na matriz energética nacional, com 88% da produção destinada a co-geração de energia nas usinas de açúcar e álcool (FERREIRA-LEITÃO et al., 2010). Desta forma, as pesquisas científicas visam estudar o potencial tecnológico da aplicação do bagaço de cana-de-açúcar na manufatura de painel para desenvolvimento de um produto de maior valor agregado, valorando a utilização do recurso fibroso.

### **A perspectiva de pesquisas**

Para a promoção do uso eficiente de materiais lignocelulósicos, segundo Bucur (2003a), são necessários o (i) desenvolvimento de técnicas não destrutivas para avaliação de suas propriedades anatômicas, físicas, mecânicas e químicas, (ii) a melhoria da qualidade da madeira através de modificação de suas propriedades e (iii) necessidade de criação de novos produtos à base da madeira para atender às necessidades da sociedade moderna. Entende-se que o presente trabalho inclui os itens (i) e (iii), visando contribuir para o desenvolvimento de novo produto e sua avaliação tecnológica por técnicas não destrutivas, pois a parte tecnológica e

produção de produtos com maior valor agregado ainda está por ser consolidada (REZENDE et al., 2008).

Os resíduos industriais têm sido utilizados em processos produtivos convencionais de painéis de fibra (MANTANIS et al., 2004, ATHANASSIADOU et al., 2005) e uma vertente interessante tem sido a utilização de resíduos de madeira oriundos do processamento mecânico ou químico na produção de painéis (IPT, 2009), o que já acontece na Europa (REZENDE et al., 2008).

As pesquisas da última década têm avaliado a aplicação de matérias primas fibrosas de resíduos de culturas agrícolas de menor custo, para a confecção de compósitos, em diferentes regiões do mundo, com resultados satisfatórios (WIDYORINI et al., 2006; LEE et al., 2006; LUZ et al., 2007; ASHORI; NOURBAKHSHB, 2008; AKGÜL; ÇAMLIBEL 2008; KHALIL et al., 2010, MENDES et al., 2010; ORTUNO et al., 2011).

Para o bagaço de cana-de-açúcar têm sido apresentados projetos para a sua utilização na produção de painéis AFB (Agricultural Fiber Board) integrados às usinas canavieiras para o aproveitamento e agregação de valor ao bagaço excedente (ECOWOOD DO BRASIL, 2009). Resultados de pesquisas nacionais e internacionais indicam a sua viabilidade em diferentes matrizes poliméricas para a confecção de compósitos (ROWEL; KEANY, 1991; TEIXEIRA et al., 1997; PAIVA et al., 1998; WIDYORINI et al., 2005; LEE et al., 2006; CAMPOS et al., 2009), notadamente o painel MDP, face dificuldade de obtenção de fibras com morfologia similar a dos painéis MDF em Instituições de pesquisa e que estão, no caso do Brasil, restritas unicamente a empresas do setor privado, bem como para reforço em matrizes poliméricas (PAIVA; FROLLINI, 2002).

Neste contexto, o desafio tecnológico foi incorporar partículas de bagaço de cana-de-açúcar, como biomassa sustentável, em uma matriz fibrosa de eucalipto para a confecção de novo produto que atendesse normas vigentes.

Face às características da matriz fibrosa dos painéis, processo de obtenção e considerando as fibras de eucalipto como matéria prima principal e tradicional, os tópicos deste trabalho terão o painel MDF como foco principal, bem como suas especificações vigentes em normas nacionais e internacionais, para caracterização tecnológica dos compósitos obtidos, porém também com algumas citações e comparativos com características e pesquisas desenvolvidas em painéis MDP.

## Objetivos

O presente trabalho teve como objetivo geral a confecção e a avaliação das propriedades anatômicas e tecnológicas de painéis de fibras de eucalipto, *Eucalyptus grandis*, e de diferentes percentuais de mistura com partículas de bagaço de cana-de-açúcar, *Saccharum sp.*

Os objetivos específicos do trabalho foram:

(i) caracterização morfológica dos elementos celulares do bagaço de colmos de cana-de-açúcar e da madeira de eucalipto constituintes dos painéis;

(ii) determinação da percentagem de partículas do bagaço de cana-de-açúcar e de eucalipto para a confecção de painéis que atendam às normas;

(iii) avaliação da dosagem de resina no desempenho tecnológico dos painéis de diferentes porcentagens de fibras de bagaço de cana-de-açúcar e de eucalipto;

(iv) confecção dos painéis em condições laboratoriais e determinação de suas propriedades físico-mecânicas considerando-se a adição de diferentes porcentagens de partículas de bagaço de cana-de-açúcar e de eucalipto;

(v) caracterização da durabilidade biológica (bioensaios) e caracterização química (teores de formol livre e de sílica) dos painéis;

(vi) utilização de análises não destrutivas clássicas e inovadoras para a caracterização tecnológica dos painéis.





## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 Produção e características do bagaço do colmo de cana-de-açúcar

O bagaço é o resíduo fibroso resultante da moagem dos colmos de cana-de-açúcar, com 48-52% de umidade, 2-3% de sólidos solúveis e 46-48% de sólidos insolúveis (fibras e demais elementos anatômicos). De 1 tonelada de cana-de-açúcar processada são produzidos, em média, 280 kg de bagaço (CTC, 2011).

No primeiro estágio do processamento industrial, os colmos de cana-de-açúcar são cortados, transportados para o desfibrador (tambor alimentador que compacta os colmos à sua entrada), precedendo um rotor (conjunto de martelos oscilantes que giram em sentido contrário à esteira), forçando a passagem dos segmentos de colmos por uma abertura de 1 cm, ao longo de uma placa desfibradora. Pela extração do caldo, obtém-se o bagaço (46% fibras), água (50%) e sólidos dissolvidos (4%) (COPERSUCAR, 2009).

Segundo Gomes (2006) o bagaço é o resíduo industrial ligno-celulósico fibroso remanescente do esmagamento dos colmos de cana-de-açúcar no dispositivo de moagem para a extração do caldo. É um aglomerado de partículas heterogêneas de grande variação granulométrica e elevado teor de umidade (média 50%), utilizado como (i) fonte direta e indireta de produção de energia e (ii) matéria-prima fibrosa para diversos fins como, possivelmente, a confecção de painéis.

A Associação de Produtores de Álcool e Açúcar do Estado do Paraná (Alcopar) divulga que 42 milhões de toneladas de cana-de-açúcar geram 11,5 milhões de toneladas de bagaço, sendo que 2 milhões de toneladas não são aproveitados e apresentam potencial para a confecção de painéis MDF e MDP (SANCHOTENE, 2007).

A composição química do bagaço integral indica similaridade com a de madeira de folhosas (Tabela 1).

Tabela 1 - Composição química do bagaço de cana-de-açúcar (adap. CTC, 2011; Klock et al., 2005)

<b>Componente</b>	<b>Bagaço cana-de-açúcar</b>	<b>Madeira de folhosas</b>
Celulose (%)	26-46	43-47
Hemiceluloses (%)	19-33	25-35
Lignina (%)	14-23	16-24

O CTC (2011 apud PATARAU, 1989) indica que o bagaço de cana-de-açúcar apresenta teor de celulose entre 26%-46%, hemiceluloses entre 19%-33%, lignina entre 14%-23% e cinzas entre 1%-5%. A amplitude dos teores indicados de celulose são ligeiramente inferiores ao verificado em literatura para a madeira de eucalipto (BRITO, 1983; SJOSTROM, 1993); para hemiceluloses, a amplitude indicada é condizente com literatura (BRITO, 1983) e para lignina a amplitude indicada para o bagaço de cana-de-açúcar é ligeiramente inferior aos valores verificados em literatura (BRITO; BARRICHELO, 1977), que variaram entre 21%-31% para 10 diferentes espécies de eucalipto.

Considerando a classificação dos componentes químicos entre o bagaço e a madeira de eucalipto, a grande diferença se encontra no teor de cinzas, ou impurezas minerais. Enquanto no bagaço há indicação de grande dispersão nos valores, com percentuais entre 0,7% (ROWEL; KEANY, 1991) chegando a 5,0% (CTC, 2011 apud PATARAU, 1989), para 10 diferentes espécies de eucalipto o teor de cinzas apresentou variação entre 0,2%-1,0% (BRITO; BARRICHELO, 1977), percentual de variação este que também é indicado por United States (1999) para a substância madeira. Romero (2007) indica que o bagaço de cana-de-açúcar apresenta teor de impurezas minerais de 2,4%, podendo ser um valor elevado e que promova maior desgaste dos equipamentos de corte durante o processamento dos painéis.

No Brasil, alguns estados concedem incentivos fiscais para a utilização de resíduos em geral e de bagaço da cana-de-açúcar. No estado do Mato Grosso, os produtos industrializados derivados do aproveitamento de resíduos da madeira e do bagaço de cana-de-açúcar geram crédito presumido de 80% do valor do imposto sobre operações relativas a Circulação de Mercadorias e sobre Prestações de Serviços de Transporte Interestadual e Intermunicipal e de Comunicação - ICMS, devido nas referidas operações de comercialização do produto industrializado, segundo Lei n. 7.200/99 (Secretaria de Estado da Fazenda do Mato Grosso, 1999) e Decreto n. 1.239/2000 (MATO GROSSO, 2011). Ainda, há incentivos fiscais para a instalação de Usinas de Açúcar e Álcool, como no estado do Rio Grande do Sul (BIOLCHI, 2010).

## **2.2 Oferta da biomassa de cana-de-açúcar**

As condições naturais e geográficas favoráveis do Brasil justificam o entendimento de que o país reúne vantagens comparativas expressivas para assumir posição de destaque, no plano mundial, na produção e uso da biomassa como recurso energético. Entre elas destacam-se a grande quantidade de terra agricultável com características adequadas do solo e condições climáticas, a perspectiva de incorporação de novas áreas onde os impactos ambientais estão circunscritos ao socialmente aceito, além da possibilidade de múltiplos cultivos dentro do ano calendário (BRASIL, 2007).

A cultura da cana-de-açúcar apresenta perspectiva de significativo crescimento de produção, área plantada e de biomassa (bagaço e palha) até 2030 (Tabela 2). O bagaço é utilizado na produção de energia elétrica e calor de processo para o atendimento da própria usina de açúcar e álcool, sendo que o excedente de bagaço mostrou significativo aumento na década de 90, devido à redução de consumo de vapor face aumento da eficiência nos processos produtivos.

Estabeleceu-se um mercado para a comercialização da biomassa e frente à possibilidade de enfardamento e de compactação aumentaram as alternativas e mercado consumidor do bagaço (CTC, 2011). A palha mantida no solo constitui-se em adubo orgânico, podendo ser recuperada através de adaptação do processo de colheita (BRASIL, 2007), com aumento da biomassa para a geração de calor e eletricidade e utilizando o bagaço da cana - queimado nas caldeiras ou produção de etanol a partir da hidrólise - para a confecção de painéis reconstituídos (vide itens 1 e 2.1).

A produção de biomassa no setor sucroalcooleiro tem condições competitivas em relação aos custos internacionais, mesmo para após 2020, com o bagaço de cana-de-açúcar com custo inferior a US\$ 10 a tonelada de biomassa em base seca e a palha a US\$ 13,70. Nos Estados Unidos, o Departamento de Energia aponta custos da biomassa de US\$ 30-35 a tonelada em 2020 (BRASIL, 2007).

Tabela 2 - Produção, área e biomassa de cana-de-açúcar de 2005-2030 (adap. BRASIL, 2007)

		2005	2010	2020	2030
<b><i>Cana-de-açúcar</i></b>					
Produção	milhões t	431	518	849	1140
Área ocupada	milhões ha	5,6	6,7	10,6	13,9
<b><i>Biomassa</i></b>					
Bagaço	milhões t	58	70	119	154
Palha	milhões t	60	73	119	160
<b><i>Biomassa ofertada</i></b>					
Uso do bagaço	%	100	100	100	100
Recuperação da palha	%	0	5	15	20

## 2.3 O eucalipto e o bagaço de cana-de-açúcar para a confecção de painéis de fibra e partícula

### 2.3.1 O painel de fibra (MDF)

A indústria de painéis de fibra teve início de desenvolvimento no começo do século 20 na Inglaterra e nos Estados Unidos da América (EUA), porém sendo na Alemanha a ocorrência da primeira linha produtora, em 1932. A indústria de painéis de fibra é relativamente nova mas com rápido crescimento, podendo utilizar resíduos agrícolas na confecção dos painéis (KOLLMANN et al., 1975). O nome do produto MDF foi criado por Harry Raddin e utilizado na descrição do processo da chapa de fibra de média densidade, em um simpósio realizado na Universidade Estadual de Washington no ano de 1967, sendo as iniciais usuais ao termo Medium Density Fiberboard e que representa um considerável avanço no desenvolvimento de painéis de madeira, atendendo a características desejáveis a esta classe de produto.

As razões para o desenvolvimento deste painel foram: tecnologia inovadora, a não geração de efluentes (ecologicamente correto) e a alternativa para a indústria de chipboard (ou aglomerado), que começou a expandir-se em outros países no mesmo período. No Brasil, o MDF teve início de produção em 1997 na cidade de Agudos-SP e, na última década, tem apresentado em conjunto com o painel MDP, tendência internacional de substituição à madeira nativa na indústria moveleira (OLIVEIRA et al., 2007, apud ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DAS INDÚSTRIAS DO MOBILIÁRIO - ABIMÓVEL, 2005).

Segundo a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) através da Norma Técnica Brasileira (NBR) 15316-1 (2006a), os painéis de fibra de média densidade são confeccionados quando o colchão de fibras, na linha de formação, encontra-se com teor de umidade abaixo de 20% e a densidade do painel é maior ou igual  $450 \text{ kg m}^{-3}$ . Estes painéis são produzidos sob ação de calor e pressão com a adição de adesivo sintético sendo classificados, para fins mercadológicos, em: (i) HDF (High Density Fiberboard): densidade  $\geq 800 \text{ kg m}^{-3}$ ; (ii) Standard: densidade  $> 650$  e  $< 800 \text{ kg m}^{-3}$ ; (iii) Light: densidade  $\leq 650 \text{ kg m}^{-3}$  e (iv) Ultra Light: densidade  $\leq 550 \text{ kg m}^{-3}$ .

O histórico da evolução da utilização de madeira de pinus e de eucalipto na produção de painéis MDF no Brasil revela que o período de 1997-2002 foi caracterizado pelo uso exclusivo da madeira de pinus; de 2003-2006, em 17% da produção utilizou-se a madeira de eucalipto; a partir de 2006, aumentou para 23% da produção, com tendência crescente de participação na produção nacional de deste tipo de painel reconstituído (BELINI, 2007).

### **2.3.2 O painel de partícula (aglomerado ou MDP)**

Os painéis de madeira aglomerada surgiram na Alemanha, no início da década de 40, visando a utilização de resíduos madeireiros devido a dificuldade do país em obter madeira de boa qualidade em decorrência da 2ª guerra mundial (IWAKIRI et al., 2005).

No Brasil, o início de sua produção foi verificado em 1966 na cidade de Curitiba – PR e, possivelmente em virtude de uso em locais não apropriados e na condição de um produto novo no mercado brasileiro, foi alvo de questionamentos quanto a limitações de qualidade. No decorrer de seu desenvolvimento foram incorporadas novas tecnologias que, aliado a uma estratégia para aproximação do painel MDF, culminaram com a nova denominação de painel MDP, marca registrada da empresa Eucatex S.A., e sendo uma das principais matérias-primas para o setor moveleiro brasileiro.

O painel aglomerado (ou MDP) é produzido a partir de pequenas partículas de madeira impregnadas com resina uréia-formaldeído (em sua maioria) e consolidado através da aplicação de calor e pressão. É um produto amplamente empregado na fabricação de móveis, em função de suas características tecnológicas, custo

competitivo e escala de produção (IWAKIRI et al., 2005) que o tornam o painel reconstituído de madeira mais utilizado no mundo.

### **2.3.3 O bagaço de cana-de-açúcar**

A utilização do bagaço de cana-de-açúcar como matéria prima para a produção de painéis reconstituídos teve início em 1920 para a produção de chapa de material isolante em Louisiana, EUA, mas sempre voltado à confecção de painéis aglomerado. Porém, as primeiras fábricas de painéis a operar com este insumo surgiram em Cuba e Taiwan no ano de 1956 e algumas, como a Taboplan na Venezuela e a Ultraboard na África do Sul, que iniciaram operação nas décadas de 60 e 70 respectivamente, já foram concebidas sob intensa pesquisa em dois quesitos primordiais à utilização do bagaço de cana-de-açúcar como matéria prima para painéis: o processo de separação das partículas evitando o excesso de material fino e a estocagem para o período de entressafra (HESCH, 1967; ATCHINSON; LENGEL, 1985). Ambos autores indicam, ainda, potencialidades para o uso do bagaço com foco na produção de painéis em países em desenvolvimento e futuro promissor para, particularmente, a confecção de painéis MDF, ou mesmo sua combinação com outras matérias primas fibrosas, como o bambu (Lee et al., 2006).

Há estudo avançado e proposta de instalação de linha de produção de painéis de madeira aglomerada atrelada à Usina de Açúcar e Álcool no interior do estado de São Paulo, e que irá utilizar exclusivamente o bagaço de cana-de-açúcar para este fim. Conforme tendências mercadológicas e decisões gerenciais, há possibilidade de aquisição de sistema de desfibramento para confecção de painéis de fibra de bagaço, aglutinado com resina UF<sup>1</sup>.

## **2.4 A importância dos componentes celulares na confecção de painéis de fibra**

Segundo Tomazello Filho (2002), o conhecimento das células e/ou tecidos que formam o lenho das espécies arbóreas é básico para a caracterização da estrutura anatômica e possibilitam estabelecer correlações com propriedades físico-mecânicas e utilização da madeira. As características anatômicas, relacionadas a estrutura celular, bem como às características químicas, constituem-se de índice de qualidade (ou grau de excelência em relação a determinado uso – Savidge (2003)) e

---

<sup>1</sup> Informação pessoal

são importantes na caracterização tecnológica das espécies da madeira auxiliando na qualificação da atividade industrial (HAYGREEN; BOWYER, 1982; TOMAZELLO FILHO, 2009). Não há dúvidas que as propriedades dos painéis MDF dependem do comprimento e da espessura da parede das fibras e traqueídes (KOLLMANN et al., 1975).

Belini (2007) avaliou o comprimento das fibras de *E. grandis* de 3 condições de desfibramento para confecção de painéis MDF, obtendo valores de 920-1000 µm, similares aos apresentados para as fibras da espécie por Alzate (2004) e Rocha et al. (2004). O comprimento médio dos componentes celulares e, principalmente das fibras, constitui-se em importante parâmetro anatômico da madeira no processo de confecção e na qualidade final de painéis MDF, sendo relacionado com as condições do desfibramento (BELINI et al., 2008; AISYAH et al., 2012).

Amostras de painéis MDF confeccionados com *P. radiata*, em ensaio de tração perpendicular para a determinação da resistência à ligação interna, evidenciaram sob microscopia eletrônica de varredura (MEV) a ruptura da parede das traqueídes nas camadas S1/S2 da parede secundária. Os autores (CHAPMAN; JORDAN, 2002) não indicaram se a ruptura é inerente à estrutura da parede das traqueídes ou do efeito do desfibramento dos cavacos de madeira.

Segundo Pranda (1995) os painéis MDF de madeira de *E. globulus* requereram maior quantidade de adesivos para propriedades mecânicas similares às dos painéis de *P. pinaster*. O inchamento e a absorção do painel MDF de eucalipto foram superiores aos do pinus, pela maior porcentagem de finos e a maior área superficial específica das fibras de eucalipto.

A redução da porcentagem de fibras longas não afeta as propriedades físicas dos painéis MDF e resulta em superfície mais lisa e compactada (RODARMEL, 1995). Xing et al. (2004 apud SUCHSLAND et al., 1990) afirmam que a morfologia e a estrutura das fibras são importantes nas propriedades dos painéis, com a área superficial específica das fibras influenciando na distribuição da resina e, em consequência, nas propriedades dos painéis.

## **2.5 Histórico do desenvolvimento dos painéis de madeira**

O entendimento global das tendências de desenvolvimento desde a década de 1970 até o presente é válido para prever as necessidades futuras e estratégias. Nesse aspecto, Borges (2008) cita pontos relevantes do histórico de



desenvolvimento dos painéis de madeira, através das diferentes décadas, sendo que a:

(i) 1ª fase, referente à década de 70: linhas de prensagem mono e multi-pratos, baixa capacidade de produção, produção não padronizada e com múltiplas normas (British Standards - BS, Deutsches Institut für Normung - DIN, Association Française de Normalisation – AFNOR e International Organization for Standardization - ISO), surgimento do painel chamado Oriented Strand Board (OSB) em 1979 e emissão de formaldeído elevada e não controlada, em média de 70 - 80 mg/100g.

(ii) 2ª fase, referente à década de 80: primeiras prensas contínuas; aumento da capacidade de produção das linhas; aumento de produção de MDF na Europa; redução progressiva das emissões de formaldeído para 20 - 40 mg/100g.

(iii) 3ª fase, referente à década de 90: início da produção de painéis MDF no Brasil em 1997; prensas contínuas cada vez maiores; grandes produtores europeus criam unidades produtivas com confecção de vários produtos no mesmo local (MDP, MDF, OSB); aumento da utilização do OSB na Europa e EUA; forte incorporação de resíduos na confecção do MDP; aumento da produtividade por redução dos ciclos de prensagem; no compensado melhoria do uso da madeira por otimização da desenrolagem.

(iv) fase atual: no Brasil aceleração da expansão da capacidade instalada, aumento da oferta de painéis laminados do tipo baixa pressão (BP), alta emissão de formaldeído quando comparada com Europa e EUA; desfavorecimento do painel compensado devido à forte dependência dos EUA e pouca diversificação de produtos. Nos EUA forte redução das emissões dos painéis através de normatizações da California Air Resource Board (CARB) e aumento da concorrência da China. Na Europa, falta de madeira em alguns países.

Na década de 1990 iniciou-se, com ênfase na Europa, uma efetiva utilização de resíduos na fabricação dos painéis MDP, tendência a ser seguida no Brasil pela disponibilidade de insumos agrícolas. A redução da emissão de formaldeído, a reciclagem dos painéis, aplicação de resinas de recursos renováveis, otimização dos 3 F's (Fiber, Food, Fuel) são os desafios apresentados para o país (BORGES, 2008). Atualmente, as classes de emissão são definidas em E1 (< 8 mg/100g) e E2 (8 – 30 mg/100g).

## 2.6 Produtos alternativos à madeira para confecção de painéis reconstituídos

A intensificação da demanda por materiais renováveis, onde o aumento da população e o padrão de consumo contribuem para o esgotamento dos recursos naturais do planeta, notadamente as florestas nativas, impute ao reflorestamento um papel crucial para a diminuição do desmatamento e, no Brasil, as árvores das espécies de *Pinus sp* e *Eucalyptus sp.* são as mais utilizadas para esta finalidade (MANHÃES, 2008), e também as mais utilizadas na indústria de painéis de fibra e partículas.

Por outro lado, têm sido realizadas pesquisas direcionadas à utilização de novas matérias primas para a confecção de compósitos reconstituídos, como:

**“Caule” da bananeira e pupunha:** o pseudo-caule da bananeira, após o corte do cacho de banana, têm sido utilizado como matéria-prima vegetal para a manufatura de produtos alternativos a madeira, denominados comercialmente de *“bananaplac”* (JORNAL DO COMMERCIO, 2007). Detalhada caracterização física e mecânica das fibras de bananeira estão indicadas em Savastano Jr. (2000 apud NOLASCO et al., 1998). O pseudo-caule da pupunha tem sido utilizado na confecção de painel compensado, utilizado na fabricação de móveis e material de revestimento (laminados de fórmica, painéis de automóveis), de peças curvas de madeira (skate, snowboards, etc.) (JORNAL DO COMMERCIO, 2007).

**Compostos lignocelulósicos:** a agroindústria brasileira gera resíduos lignocelulósicos (bagaço de cana de açúcar, palha, sabugo de milho, juta, algodão, fibra de coco, casca de arroz e casca de amendoim) com potencial de aproveitamento na fabricação de novos materiais. Neste contexto, painéis de resíduos de embalagens cartonadas e plásticas foram confeccionados utilizando os resíduos lignocelulósicos (casca de amendoim e de arroz) como reforço.

No processo, os resíduos foram misturados, homogeneizados e distribuídos em um molde de madeira para a conformação inicial do colchão por pressão manual; em seguida, transportou-se o colchão pré-moldado para prensa hidráulica com fechamento simples e dois pratos (60 x 60 cm) e, término da prensagem, o painel foi submetido a um carregamento de uma chapa de ferro (20 kgf; 41 x 41 x 2 cm) por 15 minutos. Os painéis de baixa densidade podem ser utilizados como forros, divisórias, revestimentos decorativos e outras aplicações que requerem mesmas propriedades físicas e mecânicas. Os painéis de embalagem plástica/casca de arroz (60 e 40%, respectivamente) obtiveram melhor resultado (CARASCHI et al., 2009).

Para a confecção de compostos plástico-madeira há disponibilidade de tecnologia industrial, como a prensa da Pallmann (P-LINE, 2009), com zona de resfriamento na última etapa de prensagem e pesquisas indicam a viabilidade de utilização do bagaço da cana-de-açúcar em compósitos denominados plástico-bagaço (TAVALERA et al., 2007).

**Bambu:** apresenta-se como matéria prima alternativa para a confecção de painéis pelo rápido crescimento e adaptabilidade. Os colmos de bambu podem ser utilizados para painéis laminados, contra-placados, painéis compensados (*plyboo*), painéis de partículas e aglomerado, OSB e MDF (MOIZÉIS, 2007). Na Ásia, o bambu é aplicado na confecção de painéis MDF como base para pisos laminados. O bambu é importante na proteção dos solos e com elevada fixação de gás carbônico e, desta forma, apresenta elevado índice de sustentabilidade (TEIXEIRA, 2006).

Os protótipos dos painéis de vedação vertical indicam que os componentes construtivos agilizam os processos produtivos das habitações econômicas e podem ser utilizados em qualquer tipo de sistema construtivo, mesclados com concreto, madeira e alvenaria de blocos cerâmicos.

Painéis aglomerado (ou MDP) produzidos a partir de partículas de *Bambusa vulgaris*, aglutinados com 12% de resina uréia formol e densidade de  $749 \text{ kg m}^{-3}$ , indicaram valores de módulo de ruptura (MOR) em 16,6 MPa e resistência à tração perpendicular em 0,79 MPa (PAPADOPOULOS et al., 2004). Os autores também indicam que: (i) a combinação do uso de bambu com a matéria prima madeireira; (ii) o uso de sistemas alternativos de resina ou (iii) modificações químicas nos cavacos de bambu ou madeira podem ser interessantes frentes de investigações científicas.

**Raspa de couro:** resíduos de curtumes (serragem cromada, raspa de couro) considerados perigosos pela presença de cromo podem ser utilizados na confecção de placas para divisórias e forros, em regiões como a da cidade de Bocaina - SP, que produz 10 toneladas de raspa de couro/dia (RENÓFIO; FERREIRA, 2001).

**Painéis-sanduíche:** são confeccionados com madeiras alternativas e insumos não madeireiros e utilizados em edificações, notadamente para o fechamento vertical. Painéis feitos com madeira de reflorestamento aliam o desempenho ambiental com a rapidez da produção em canteiro, com grande flexibilidade em relação à associação de novos materiais (naturais ou sintéticos) com qualidade térmica, acústica e redução de peso e de dimensão. Para o fechamento vertical de edificações, desenvolvidos ou em desenvolvimento no Brasil, citam-se

painéis OSB, painéis sanduíche de eucalipto, de bracinga e estrutura de eucalipto, de madeira colada lateralmente, de cimento-madeira e de madeira-plástico (SANTOS; AGUILAR, 2007).

**Fibras de babaçu:** painéis aglomerados com misturas de até 30% de fibras de babaçu com traqueídes de *Pinus sp* apresentam propriedades mecânicas similares. A região Nordeste do país, notadamente a Mata de Cocais no estado do Maranhão, apresenta potencial para a aplicação das fibras de babaçu, com produção de 1,5 milhões de toneladas por ano (LIMA et al., 2006).

**Painéis fibrocimento:** surgiram como elementos construtivos na Europa, no final dos anos setenta. O cimento transmite o esforço entre as partículas de madeira, mantendo-as protegidas do meio e permitindo sua orientação apropriada; a madeira aumenta a resistência à tração e reduz a densidade e o custo. Os compósitos cimento-madeira apresentam baixa densidade em relação ao concreto, melhor desempenho às intempéries, fogo, fungos e insetos, em relação à madeira. Estudos são direcionados para determinar os percentuais de madeira e de cimento, efeito nas propriedades físico-mecânicas e aplicações (MATOSKI, 2007).

Fibras naturais, como reforço de matrizes frágeis à base de materiais cimentícios, têm despertado grande interesse nos países em desenvolvimento, por causa de seu baixo custo, disponibilidade, economia de energia e também no que se refere às questões ambientais (SAVASTANO JR., 2011). Este autor, apud Coutts (1992) e Heinricks et al. (2000), indica o avanço nos processos produtivos com custos de investimento cada vez menores e que a produção de compostos cimentícios, com reforço de fibra celulósicas, está principalmente localizada nos Estados Unidos e Europa.

**Casca de arroz:** similar ao bagaço de cana-de-açúcar, tem sido aplicado na queima para geração de energia, com pesquisas em argamassa de concreto na forma de cinzas e confecção de painéis com 100% fibras de arroz (FERREIRA et al., 2007). A cascaria é disponível praticamente o ano todo e corresponde a 19-23% da produção nacional de arroz, sendo que em 2006 foram geradas 2,6 milhões de toneladas em casca (VALE; GENTIL, 2008). Sua cinza é apontada como resíduo agrícola brasileiro de maior atividade pozolânica. Já há desenvolvimento de novos processos visando otimização da queima e melhoria da qualidade das cinzas para utilização conjunta em produtos cimentícios (SAVASTANO JR., 2000 apud CINCCOTO et al., 1990).

## 2.7 Aplicações e aspectos mercadológicos dos painéis MDF

A grande aceitação mercadológica do painel MDF é resultado da homogeneidade das propriedades físico-mecânicas e da excelente trabalhabilidade, especialmente nas usinagens de borda e superfícies, tornando-o cada vez mais utilizado na indústria de móveis como um diferenciador de qualidade (BENADUCE, 1998; BNDES, 2002; IWAKIRI et al., 2005), suprimindo grande parte dos requisitos técnicos que eram demandados, mas não preenchidos, pelo painel aglomerado (INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS - IPT, 2009).

Gorini (1998) indica que o setor moveleiro utiliza como principais matérias primas para produção de móveis retilíneos os painéis MDF, MDP e compensados. Para móveis torneados, que reúnem detalhes mais sofisticados de acabamento, indica como principal matéria prima a madeira maciça, de lei ou de reflorestamento, mas podendo também incluir painéis MDF usinados. Rosa et al. (2007) afirmam que, com o avanço da tecnologia e qualidade dos materiais, as madeiras maciças passaram a ser mais laminadas e aplicadas sobre painéis reconstituídos, otimizando a utilização dessa nobre matéria prima.

O setor de molduras, cujo consumidor majoritário é o segmento da construção civil e o mercado internacional, utiliza como matéria prima predominante o *Pinus sp*, mas também são utilizados painéis MDF. Já o setor de esquadrias tem passado por intensa modernização, refletindo a adoção de novas tecnologias e matérias-primas, como a introdução dos painéis MDF e OSB (BUAINAIN; BATALHA, 2007).

Também de acordo com Buainain e Batalha (2007), os pisos de madeira mais conhecidos e utilizados são os fabricados em madeira maciça e os pisos “engenheirados”, ou seja, compostos em camadas. Os pisos de madeira maciça são feitos, geralmente, com madeiras nobres, enquanto que os pisos “engenheirados” são fabricados com diferentes materiais, utilizando substratos de painéis reconstituídos (compensado, MDF, HDF, aglomerado) e revestidos com lâminas de madeira nobre ou papéis melamínicos, sendo denominados pisos laminados.

Mesmo com a primeira linha produtiva sendo instalada no Brasil em 1997, já havia indicação do uso crescente dos painéis MDF (IPT, 1997), sendo que o crescimento previsto, oriundo do aumento da capacidade instalada das empresas e inserção de novos fabricantes (Tabela 3), indica que no período 2007-2013 estima-se a duplicação da produção, com mais de 4 milhões de m<sup>3</sup>/ano (DURATEX, 2008), devendo-se considerar a fusão entre as empresas Duratex S.A.- Satipel Industrial

S.A. e Celulosa Aruaco y Constitución S.A.- Tafisa Brasil S.A., ambas ocorridas no ano de 2009.

A Figura 4 ilustra a demanda do mercado e a capacidade de produção de painéis MDF no Brasil, no período 1997-2013, com aumento da produção em 2003 e 2009, pelo início da operação de novas plantas, sendo que a partir de 2003 foram necessários 3 anos para o mercado absorver o acréscimo da produção. Nos últimos 10 anos, o crescimento no consumo de painéis MDF foi cerca de 200 vezes maior que o crescimento do PIB brasileiro.

Tabela 3 – Empresas, localização e capacidade de produção de painéis MDF no Brasil (adap. Duratex, 2008)

Empresas	Localização (Estado)	Capacidade (Mil m <sup>3</sup> /ano)	
		2007	2013
Celul. Arauco y Const. S.A	PR	300	700
Berneck S.A.	PR	0	350
Duratex S.A.	SP	670	1830
Eucatex S.A.	SP	0	330
Fibraplac S.A.	PR	370	440
Guararapes Ltda.	SC	0	90
Masisa Brasil	PR	240	240
Satipel Industrial S.A.	MG	0	--
Sudati Ltda.	SC	0	90
Tafisa Brasil S.A.	PR	400	--
<b>TOTAL</b>		<b>1980</b>	<b>4070</b>

Brasil - Demanda e Capacidade de Produção de Painéis MDF (1997 - 2013)

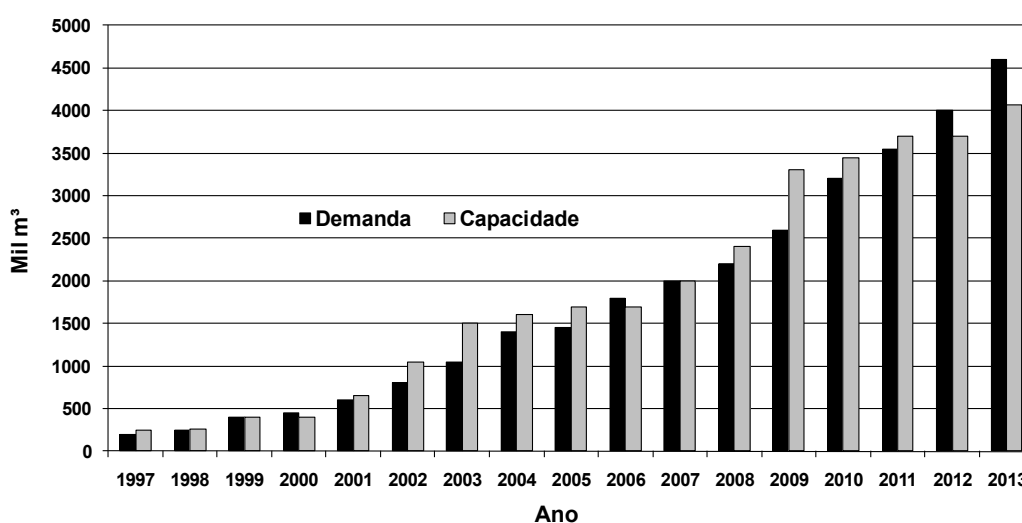


Figura 4 – Demanda de mercado e capacidade de produção de painéis MDF no Brasil, entre 1997 e 2013 (adap. Duratex, 2008)

As regiões sul e sudeste do Brasil consomem 90% dos painéis MDF pela localização dos pólos industriais moveleiros e poder aquisitivo da população. Outros importantes consumidores de painéis MDF são os segmentos de revenda - casas comerciais especializadas na venda de painéis revestidos e as da construção civil, utilizando como substrato de pisos laminados de alta resistência (ABIPA, 2008).

Os painéis MDF, em comparação com os demais painéis de fibras e partículas (MDP e o HB – Chapa Dura ou Hardboard), apresentam a maior taxa de crescimento, de 15% nos próximos 5 anos. Ligado a esta taxa de crescimento está o de pisos laminados de alta resistência (flooring) que utilizam o painel MDF de alta densidade na sua fabricação (MASISA, 2010).

## **2.8 Insumos utilizados na confecção dos painéis MDF**

### **2.8.1 Resina**

Para a manufatura de alguns produtos da madeira são utilizadas colas aglutinantes denominadas de adesivo, permitindo uma aplicação mais racional da madeira e, em consequência, a utilização sustentável do recurso florestal (PIZZI; MITTAL, 2003).

As resinas amínicas utilizadas no processo de produção de painéis reconstituídos de madeira são formadas a partir da reação entre compostos que possuem grupos reativos entre si (grupos carbonílicos + grupos amino, imino ou amida) formando estruturas tridimensionais altamente complexas, de pesos moleculares praticamente infinitos, com características de infusibilidade e insolubilidade, pertencendo ao grupo dos polímeros termofixos.

O termo resina sintética é genérico de uma classe de produtos que, quando seco (ou após cura) têm composição química complexa e alto peso molecular, insolúvel em água, dureza, infusibilidade, boas propriedades térmicas e fácil adaptação às condições de cura, baixo custo, rápida reação de cura em prensagem a quente, claras ou transparentes. No entanto, os painéis não apresentam resistência à umidade em utilização externa (ROYALPLÁS, 2002).

O desenvolvimento de resinas sintéticas foi o grande responsável pelo impulso na indústria de painéis de madeira e, a partir de 1930, a disponibilidade de resinas líquidas a base de uréia formaldeído e fenol formaldeído permitiram a confecção de painéis de qualidade superior. A indústria de aglomerado, com

desenvolvimento inicial nos anos 40, já foi concebida utilizando as resinas sintéticas como agente aglutinante.

Dentro do grupo de resinas termofixas, as resinas uréica formaldeído são as mais importantes e as mais aplicadas na indústria de painéis de madeira, onde acima de 90% dos painéis produzidos mundialmente utilizam resina uréica (MALONEY, 1993; PIZZI, 1994; CARNEIRO et al., 2007), sendo deste modo escolhida para utilização no presente trabalho.

Para efeitos didáticos, pode-se dizer que o processo de formação das resinas amínicas, assim como dos demais polímeros termofixos, pode ser resumido em 3 etapas: (i) Estágio A – cadeia de baixo peso molecular, inexistência de ligações cruzadas, estado líquido. Ocorre dentro do reator em que a resina está sendo produzida; (ii) Estágio B – cadeia de médio peso molecular, cadeias maiores que as do estágio A, inexistência de ligações cruzadas, estado sólido (porém ainda consegue-se fundí-la). Estágio iniciado dentro do reator, prolongando-se até sua utilização e (iii) Estágio C – cadeia de altíssimo peso molecular, existência de ligações cruzadas, estado sólido (insolúvel e não se consegue fundí-la) e conhecido como cura, ocorrendo durante a prensagem do painel.

Pesquisas têm aprimorado o desenvolvimento de resinas uréicas que apresentam cura extremamente mais rápida. Na década de 1960, um aglomerado padrão com espessura 19 mm, produzido com resina uréica, demorava aproximadamente 15 minutos para cura em prensa (MALONEY, 1993). Atualmente, e dependendo do sistema utilizado, o tempo de cura apresenta-se pela metade do indicado e em muitos casos ainda bem menor. Todo este desenvolvimento é uma das razões para o rápido crescimento do processo seco para confecção de painéis, tecnologia esta que foi utilizada na confecção dos painéis do presente trabalho.

### **2.8.1.1 Formaldeído**

Se um adesivo com base de formaldeído é usado para fazer um painel, em seguida o formaldeído irá tornar-se uma parte do polímero adesivo e tem potencial para ser liberado se for degradado. Esta fonte de formaldeído não é, possivelmente, a principal fonte, sendo o formaldeído na forma livre ou associado com a água ligada na parede celular da madeira, ou como hemi-acetais, o mais importante. Os valores de formaldeído livre sofrem grande influência da umidade das amostras de painéis (IRLE et al., 2008) que por sua vez é influenciada por vários fatores, incluindo: (i)



matérias primas, (ii) tecnologia de fabricação, (iii) estrutura do painel e (iv) as condições ambientais em que os painéis são armazenados.

Por ser um componente classificado como cancerígeno pela Organização Mundial de Saúde – OMS (MULLEN, 2008) e relevante foco de pesquisas visando sua redução nos painéis de madeira (BORGES, 2008), estudo são desenvolvidos principalmente com resinas alternativas indicadas como “formaldehyde free” (MULLEN, 2008) mas também com incorporação de matérias primas alternativas (BUYUKSARI et al., 2010) que, mesmo não tendo este foco como principal, podem ser alternativa para redução dos valores de formol livre, como também será verificado nos resultados da presente pesquisa.

### **2.8.2 Emulsão de parafina**

A emulsão de parafina é oriunda de hidrocarbonetos presentes no petróleo e se constitui de uma dispersão estável de partículas sólidas e parafina em água. Na emulsão, a composição química e o tamanho das partículas das ceras exercem grande influência no principal fim a que se destina: agente hidrofóbico em painéis derivados de madeira (ROFFAEL; SCHNEIDER, 19--).

Apresenta, como principais características: (i) fluidez em temperaturas ambiente, (ii) podem ser aplicadas em processos úmidos e secos para confecção de painéis e (iii) possuem melhor distribuição, comparativamente às ceras, devido ao tamanho da partícula.

A emulsão é amplamente utilizada como agente hidrorrepelente na confecção de painéis MDF e MDP em diversas dosagens e diferentes formulações de acordo com as especificações do produto.

## **2.9 Propriedades tecnológicas de painéis MDF e MDP de resíduos vegetais**

Os painéis foram concebidos com intuito de melhorar características mecânicas, tais como a rigidez, tenacidade e resistência, nas condições ambiente e a altas temperaturas, além de atender às novas solicitações do mercado, entre elas a sustentabilidade (CALLISTER, 2000).

A utilização e a eficiência das fibras vegetais em compósitos é antiga, embora a aplicação industrial seja pequena em função, provavelmente, dos custos de adaptação do processo produtivo e da falta de informações de disponibilidade no mercado, sendo de grande importância para a construção civil nos países em

desenvolvimento. A geração de resíduos agrícolas está associada às (i) características do processo de obtenção das fibras e do método de desfibramento, (ii) mercado seletivo e restrito, (iii) perecimento dos produtos e (iv) poucas informações disponíveis para a destinação e utilização (SAVASTANO JR., 2000).

Algumas propriedades mecânicas dos painéis MDP, especialmente o módulo de elasticidade (MOE), o módulo de ruptura (MOR) e resistência à tração interna, são afetadas por muitas variáveis envolvidas no processo de produção, como a densidade e composição dos painéis, a dosagem de resina, a taxa de compressão, a dosagem de parafina e o tamanho das partículas (KELLY, 1977). Alguns destes parâmetros, com destaque para a densidade dos painéis e dosagem de resina, também podem ser entendidos como variáveis extremamente importantes para a conjugação das características tecnológicas finais de painéis MDF.

Painéis MDF que utilizaram percentuais de mistura (0-25-50-75-100%) de madeira de rhododendron (*R. ponticum*), arbusto nativo de países do mediterrâneo, com as madeiras de *Pinus sylvestris* e de *Quercus robur*, apresentaram viabilidade de utilização da matéria prima arbustiva e os resultados dos ensaios físico-mecânicos indicaram redução do inchamento do painel em relação ao aumento do percentual de fibras de *R. ponticum*, não afetando os valores de módulo de ruptura e elasticidade e de resistência a tração perpendicular (AKGÜL; ÇAMLIBEL, 2008).

Painéis MDF confeccionados com bagaço da cana-de-açúcar e colmos de bambu têm suas propriedades afetadas em função da morfologia das fibras: as de menor dimensão apresentaram maior área superficial específica de fibras exposta ao recobrimento pela resina, reduzindo os valores de resistência à tração perpendicular, MOR e MOE (LEE et al., 2006).

Fibras de *Hibiscus cannabinus* L., obtidas após desfibramento em 7 bar por 5 minutos e aglutinadas com 12% de resina uréia formol, foram utilizadas na confecção de painéis MDF com 10 mm de espessura e densidade nominal de 700 kg m<sup>-3</sup> e indicaram valores de MOR, MOE e *internal bond* (IB, ou resistência à tração perpendicular) em 30,3 MPa, 3619 MPa e 0,66 MPa, respectivamente (AISYAH et al., 2012).

Para painéis MDP confeccionados com partículas de *H. cannabinus* L., aglutinados com 12% de resina uréia formol, com espessura de 12 mm e densidade de 730 kg m<sup>-3</sup>, Grigoriou et al. (2000) verificaram valores de resistência à tração perpendicular em 0,39 MPa e valor de *springback* em 8,9%.

Kubler (1980) indica que, como os painéis aglomerados (MDP) e MDF são produzidos com o controle da densidade e das propriedades, é difícil sua comparação qualitativa com painéis compensados e de madeira maciça, que são dependentes da qualidade e defeitos intrínsecos da madeira.

Painéis aglomerados confeccionados com 100% de bagaço de cana-de-açúcar - partículas retidas nas peneiras de abertura da malha de 2-3 mm - confeccionados com resinas à base de taninos e de resina uréia formaldeído (principal adesivo da indústria de painéis de fibras e de partículas) apresentaram “resistência moderada” ao ataque de fungos apodrecedores. Esses painéis são equivalentes aos de madeira (aglomerado normal), porém, a resistência ao ataque de fungos é menor, sendo classificados como “resistentes” (TEIXEIRA et al., 1997).

Lee et al. (2004) verificaram desempenho de painéis MDF confeccionados com diferentes misturas de fibras de *Sapium sebiferum* (árvore ornamental introduzida nos EUA) e de bagaço de cana-de-açúcar, ambas geradas em refinador de disco com 0,127 mm de abertura. De modo geral, indicaram que as propriedades dos painéis decresceram com o aumento do percentual de fibras de bagaço e que há melhores características tecnológicas atreladas ao uso de resina diisocianato difenilmetano (MDI), pura e/ou em mistura com resina uréia formol.

Na Eurora, Pereira et al. (1996) indicam experimentações em plantios adensados de *Eucalyptus globulus* e *Eucalyptus camaldulensis*, com até 40000 árvores por hectare e ciclo de corte entre 1 e 2 anos, destinados aos fornecimento de matéria prima para processos industriais e energéticos. Como processos indústrias, pode-se citar a indústria de painéis reconstituídos.

Na literatura internacional verifica-se o termo “bio-based composite panels”, que pode ser entendido como painéis reconstituídos oriundos de resíduos biológicos, e tem aplicação ampla na avaliação de diversas matérias primas fibrosas agrícolas e florestais para confecção de painéis. Nesta linha de pesquisa, Shupe et al. (2006) confeccionaram painéis de partículas e de fibras utilizando *Triadica sebifera* syn, espécie invasora do sudeste dos EUA, aglutinados com 8% de resina uréia formol, e verificaram valores de resistência à tração perpendicular em 0,33 N mm<sup>-2</sup> e 0,80 N mm<sup>-2</sup> para os painéis MDF e MDP, respectivamente. Também determinaram valores de MOR em 23,5 N mm<sup>-2</sup> para ambos painéis e MOE em 2366 N mm<sup>-2</sup> e 3450 N mm<sup>-2</sup> para os painéis MDF e MDP, respectivamente, indicando viabilidade de utilização desta matéria prima alternativa.

## **2.10 Densitometria de raios X aplicada à análise de painéis**

Além de propriedades físico-mecânicas, na fabricação de painéis de fibras e partículas é importante a determinação e a análise dos perfis de densidade por densitometria de raios X, considerada como uma das principais técnicas não destrutivas de análise da qualidade dos painéis MDF (GRECON, 2011) e da madeira de árvores de espécies florestais (TOMAZELLO FILHO et al., 2008) devido à precisão, detalhamento e praticidade.

A obtenção do perfil densitométrico dos painéis é considerada análise de rotina no controle de produção, constituindo-se em importante parâmetro de avaliação da sua qualidade e aplicação (FEENEY et al., 1996; WANG et al., 2006; CAI et al., 2006) e permitindo inferências quanto às propriedades mecânicas dos painéis e calibração dos ciclos de prensagem. A análise por raios X pode, também, ser aplicada na determinação do perfil de densidade horizontal de painéis de madeira (CHEN et al., 2009).

## **2.11 Espectroscopia no infravermelho próximo (NIR) aplicada à análise de painéis**

No levantamento dos setores na economia brasileira que aplicavam a tecnologia NIR, Pasquini (2003) indica o setor de agricultura como primeiro a utilizar intensivamente as técnicas de espectroscopia, além da ampla aplicação na análise de processos produtivos.

Várias aplicações envolvendo espectroscopia NIR têm sido propostas (TSUCHIKAWA, 2007), tornando esta técnica uma ferramenta promissora para a avaliação de produtos lignocelulósicos. Estudos recentes têm confirmado o potencial da espectroscopia NIR para avaliar uma série de características da madeira, incluindo mecânicas (FUJIMOTO et al., 2008), físicas (MORA et al., 2008), químicas (KELLEY et al., 2005; ZAHRI et al., 2008), morfológicas (VIANA et al., 2009) bem como cura e qualidade de colagem (BEALL, 2007).

Em painéis de madeira há aplicações de espectroscopia NIR na identificação do percentual de resina (TAYLOR; VIA, 2009), no controle do processo de fabricação (HORWATH et al., 2005), nas características morfológicas (VIANA et al., 2009; MULLER et al., 2009), na caracterização das propriedades químico-físico-mecânicas (RIALS et al., 2002) e na identificação de percentuais de resíduos agrícolas incorporados (BELINI et al., 2011a).

Campos et al. (2009) utilizaram NIR na determinação do percentual de matéria prima em painéis aglomerados confeccionados com diferentes percentuais de fibras de eucalipto, pinus e de bagaço de cana-de-açúcar; verificaram o potencial da técnica NIR como ferramenta de controle de qualidade, indicando a necessidade de pesquisas. Para o estabelecimento de modelos preditivos confiáveis e menores desvios, recomendam a utilização de menores intervalos na quantidade percentual da matéria prima, sugerindo-se os intervalos em valores crescentes de 5% na variação percentual de matérias primas. Continuando este trabalho, Hein et al. (2011) utilizaram essas amostras de partículas visando desenvolver a calibração NIR para as propriedades físicas e mecânicas.

Estes estudos apresentaram resultados encorajadores, indicando o potencial da técnica de espectroscopia NIR como uma ferramenta para controle de qualidade no processo de fabricação. Apesar de inúmeros estudos terem demonstrado o potencial da combinação de dados espectroscópicos de análise multivariada de dados como uma ferramenta rápida e confiável para a caracterização de produtos de madeira processada (HEIN et al., 2011), existe uma lacuna entre estudos acadêmicos e aplicações industriais (HUBBE, 2010). Entretanto, mais pesquisas ainda são necessárias em escala laboratorial a fim de gerar um melhor entendimento sobre espectroscopia NIR aplicada em produtos à base de madeira antes de melhor difundir esta técnica no âmbito industrial.

## **2.12 Análises óticas (deflectometria) aplicada à análise de painéis**

As propriedades elásticas de um painel reconstituído de madeira são observadas quando a carga aplicada se situa abaixo do limite proporcional de elasticidade, podendo-se deste modo calcular o MOE. Quando ocorre acima deste limite há deformações plásticas, que são irreversíveis e sempre seguidas pela ruptura do material, possibilitando deste modo calcular o MOR.

A técnica de deflectometria é amplamente utilizada na caracterização do comportamento elástico de placas poliméricas e metálicas durante a aplicação de cargas/forças que promovam a flexão (SURREL, 2004), por metodologia de reflexão da imagem. Apresenta, como vantagem, a possibilidade de determinar o módulo de elasticidade na totalidade dimensional dos painéis em análise, comparativamente ao corte de amostras de pequenas dimensões utilizadas na determinação clássica desta variável.

Segundo Kim (2008), quando os testes de flexão são realizados em placas finas, as tensões estão relacionadas com a curvatura da amostra, de acordo com a teoria de placas finas de Love-Kirchhoff. A deflectometria é capaz de medir as deformações planas diretamente, sendo de baixo custo, não afetada pelas perturbações ambientais e de vibração, em comparação às técnicas interferométricas. O princípio da deflectometria é baseado na lei de Snell da reflexão da luz especular (Figura 5).

A técnica da deflectometria consiste em observar a imagem de uma grade de linhas com a superfície da amostra a ser avaliada e, em seguida, para o processo de mudança de fase causada por uma rotação local (aplicação de força e, conseqüente, deformação). A deflectometria exige que a superfície da amostra a ser avaliada apresente quantidade suficiente de reflexão especular, podendo ser descrita pelas fases: (i) em repouso, a luz do ponto P do sistema de referência é refletida no ponto M sobre a placa antes de chegar à câmera Charged Coupled Device (CCD) e (ii) quando a placa se deforma em flexão, as alterações da curvatura local no ponto M mudam pelo  $d\alpha$  e a câmera CCD registra a luz que vem do ponto Q da grade de referência, separados de P por  $u$ .

Portanto, uma mudança de curvatura da placa avaliada leva a uma mudança de local a imagem do sistema de referência visto pela câmera. A primeira imagem da placa em repouso é tomada e o campo de fase é calculado utilizando uma fase específica de um algoritmo. Em seguida, a placa é deformada e outro campo de fase é calculado. A diferença de fase entre as imagens inicial e deformada se relaciona diretamente ao campo de curvatura local (Figura 5).

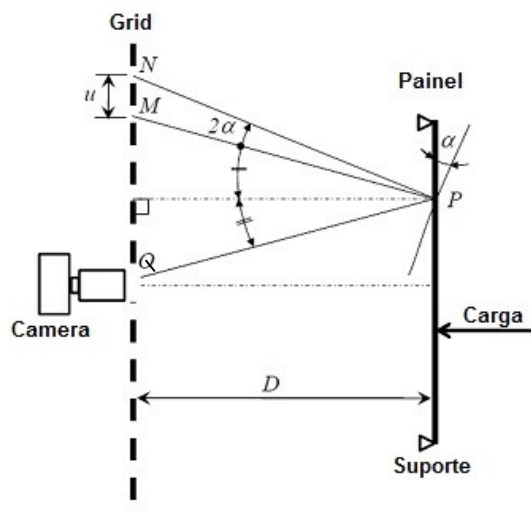


Figura 5 – Princípios da técnica de deflectometria (adap. Kim, 2008)

### **2.13 Microtomografia de raios X (microCT) aplicada à análise de painéis**

A microtomografia computadorizada de raios X (microCT) fundamenta-se na atenuação de feixes de raios X que, ao atravessar um objeto em análise em diversos ângulos, possibilita a reconstrução da sua estrutura interna. Como técnica não-destrutiva apresenta inúmeras vantagens na análise da madeira e de seus produtos, mantendo a integridade das amostras e dispensando o árduo processo laboratorial de confecção de lâminas histológicas (STEPPE et al., 2004; WENERSSON et al., 2009).

A microCT constitui-se uma das mais avançadas tecnologias de análise não destrutiva, proporcionando a construção de imagens da estrutura interna em 2D e 3D (MAYO et al., 2010) e é de recente aplicação na análise anatômica da madeira (STEPPE et al., 2004; VAN DE BULCKE et al., 2009a; TRKIT et al., 2010) e de produtos da madeira (LUX et al., 2006), porém ainda sendo raros trabalhos com utilização desta técnica para controle e caracterização de compósitos de madeira (BUCUR, 2003a).

Ainda, a microCT apresenta-se como importante e potencial metodologia para a caracterização da qualidade da madeira, dos anéis de crescimento do lenho, dos defeitos do lenho resultantes do crescimento e do ataque de organismos xilófagos na madeira (WU; PENG, 2007; VAN DEN BULCKE, 2009b; TRKIT et al., 2010).

No processamento da análise microtomográfica, os raios X emitidos pela fonte (tubo de raios X) atravessam a amostra de painel, no sentido longitudinal, a distâncias de 2,3  $\mu\text{m}$ , com a radiação não atenuada captada por um intensificador de imagens e, em seguida, por um detector (câmera CCD), conforme Figura 6.

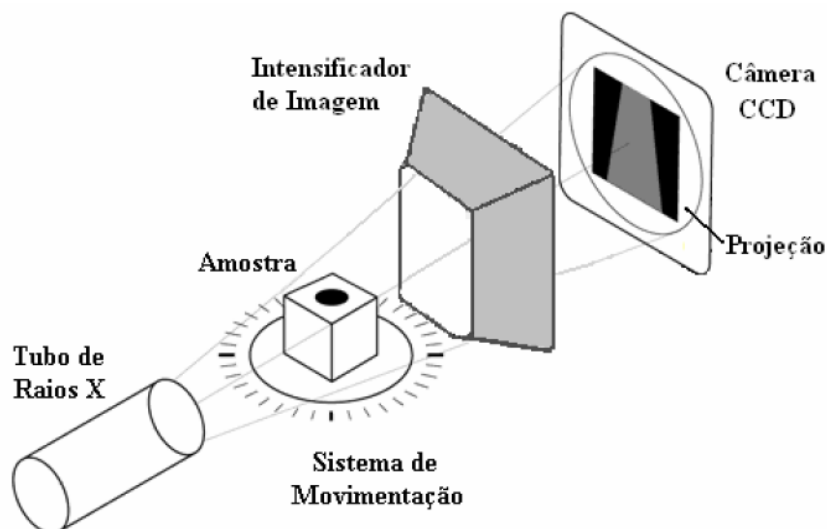


Figura 6 - Princípio de funcionamento e componentes básicos do microCT, indicando o tubo de raios X, posicionamento da amostra na câmara de irradiação, intensificador de imagem e projeção da imagem da estrutura anatômica coletada em câmera CCD (adap. Pereira, 2009)

#### 2.14 Microscopia eletrônica de varredura (MEV) aplicada à análise de painéis

O MEV foi desenvolvido em 1965 e tem grande importância na análise de pequenas amostras de materiais biológicos (GALLETI, 2003), fixadas em suporte e metalizadas para evitar que os elétrons incidentes sejam absorvidos pela amostra (KITAJIMA; LEITE, 1999).

O princípio do MEV baseia-se no uso de um feixe de elétrons que promove a varredura da amostra do material biológico sob vácuo, com contribuições marcantes nas áreas de biologia e de ciências de materiais pelos detalhes visualizados (KITAJIMA; LEITE, 1999), sendo amplamente utilizado na investigação da microestrutura da superfície de polímeros celulósicos (SOARES; SARON, 2010).

O MEV é um equipamento adequado na análise de produtos da madeira, podendo identificar a distribuição da linha de cola em painéis compensados (COLLET, 1970); caracterizar os componentes celulares de painéis MDF (ELEOTÉRIO, 2000; BELINI, 2007) e analisar a estrutura anatômica da madeira e falhas de painéis OSB em ensaios de ligação interna (ZEGARRA, 2011).

Tanobe (2003) indicou que a ruptura dos compósitos de madeira é afetada pela interação fibra-fibra, com o MEV permitindo a sua caracterização. Singh et al. (2008) aplicaram técnicas de microscopia, incluindo o MEV, na avaliação da



interface madeira-adesivo de painéis compensados de *P. radiata*, obtendo imagens para a explicação das ligações dos 2 componentes.

O MEV foi utilizado por Belini et al. (2008) na avaliação de condições de desfibramento de cavacos de *E. grandis*, identificando e diferenciando os aspectos morfológicos e da microestrutura dos componentes celulares e sua relação com o desfibramento, bem como na interpretação das propriedades tecnológicas dos painéis MDF.

### 3 MATERIAL E MÉTODOS

#### 3.1 Coleta do bagaço de cana-de-açúcar, da madeira e das fibras de eucalipto

##### 3.1.1 Local e coleta do bagaço de cana-de-açúcar

Amostras de bagaço de cana-de-açúcar foram coletadas no pátio da Usina Açucareira São Manoel S.A, em São Manuel-SP (Figura 7A, B e C). O material “in natura” foi acondicionado em sacos plásticos e transportado para o Laboratório de Anatomia, Identificação e Densitometria de Raios X de Madeiras do Departamento de Ciências Florestais (LCF) da ESALQ/USP, em Piracicaba-SP.

As amostras de bagaço foram coletadas na saída do sistema de esmagamento e de obtenção do caldo, uma vez que as partículas de cana-de-açúcar estocadas em pilhas da safra do ano anterior podem sofrer degradação por microorganismos termofílicos (Figura 7D). Posteriormente, foram secas em estufa à 105°C, atingindo 5% de umidade, para evitar o desenvolvimento de microorganismos e, na sequência, submetidas à classificação morfológica das frações para a caracterização anatômica e confecção dos painéis.

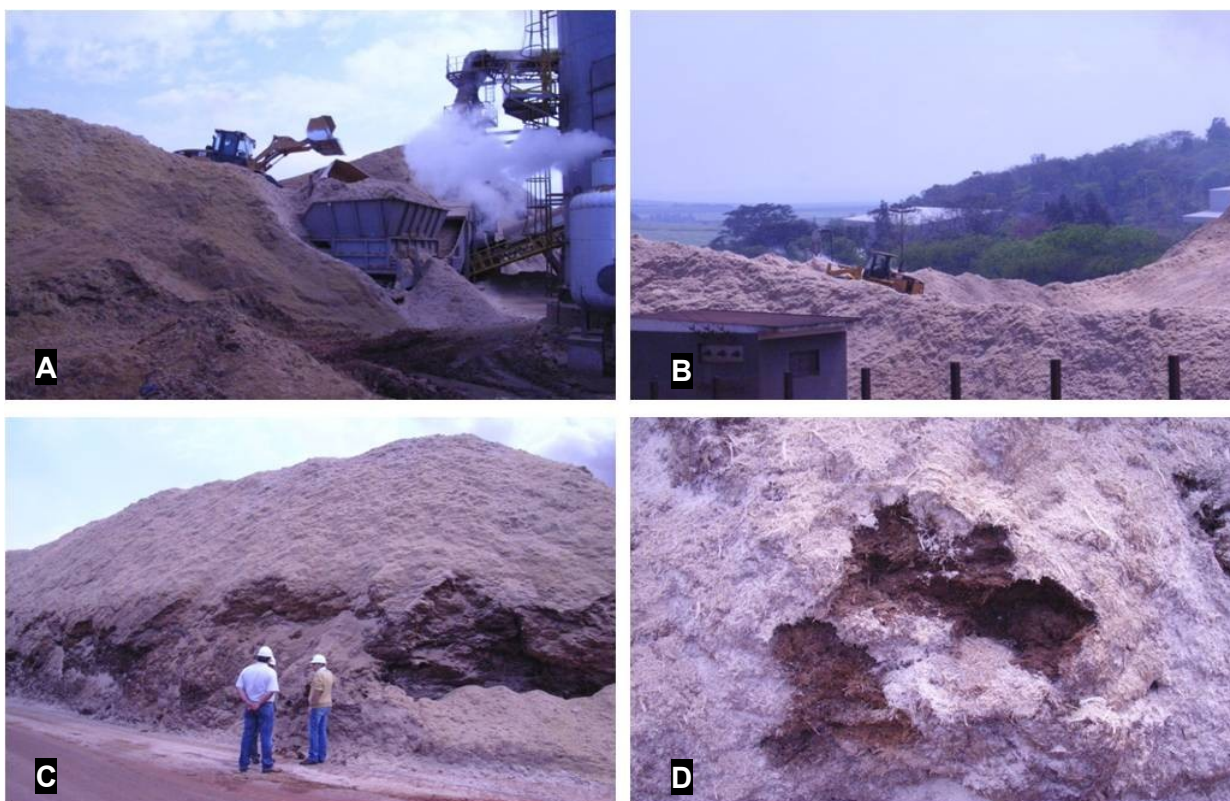


Figura 7 – Carregamento e disposição do bagaço de cana-de-açúcar no pátio de estocagem (A, B, C); aspecto das partículas parcialmente degradadas no interior da pilha (D)

### **3.1.2 Local de coleta da madeira e fibras de eucalipto**

Árvores de *Eucalyptus grandis*, de 7 anos, de material genético seminal de pomar de sementes clonal, foram selecionadas de plantações da empresa Duratex S.A., em Botucatu-SP. As toras de madeira, com 6 m de comprimento, foram transportadas para o pátio de estocagem, transformadas em cavacos de madeira e em fibras através de processo termo-mecânico por atrito de 2 discos em alta rotação (BELINI, 2007). Os componentes fibrosos da madeira de eucalipto foram coletados para a caracterização morfológica e confecção dos painéis em fase anterior ao processo de encolagem, em linha industrial da empresa Duratex S.A., em Botucatu-SP.

## **3.2 Caracterização dos colmos de cana-de-açúcar, da madeira de eucalipto e de sua mistura em diferentes porcentagens**

### **3.2.1 Caracterização anatômica dos colmos de cana-de-açúcar**

**Caracterização macroscópica:** a morfologia dos componentes celulares do bagaço de cana-de-açúcar foi analisada sob estereoscópio Nikon SMZ-10 (25X ampliação) com imagens computacionais adquiridas pelo sistema AVT Smart View, pertencentes ao Laboratório de Produtos Florestais da Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro (UTAD) em Vila Real-Portugal, bem como foram coletadas imagens fotográficas.

### **3.2.2 Caracterização anatômica da madeira de eucalipto**

**Caracterização macroscópica:** a morfologia das células da madeira de eucalipto, após o seu desfibramento, foi analisada sob estereoscópio Nikon SMZ-10 (25x) e processadas de acordo com o descrito no item 3.2.1.

### **3.2.3 Caracterização macroscópica da mistura de partículas de cana-de-açúcar e fibras de eucalipto em diferentes porcentagens**

A morfologia dos componentes celulares da madeira de eucalipto e das partículas de cana-de-açúcar, selecionadas nas porcentagens de mistura das Etapas A e B (item 3.3.1) foram analisadas sob microscópio estereoscópio Olympus SZX 12 (35x) e por imagens fotográficas para a comparação visual das composições morfológicas, no Laboratório de Produtos Florestais da UTAD.

### **3.2.4 Análises complementares dos colmos de cana-de-açúcar, da madeira de eucalipto e de sua mistura em diferentes porcentagens**

**3.2.4.1 Microscopia eletrônica de varredura (MEV):** os componentes desfibrados da madeira de *Eucalyptus grandis*, as frações de bagaço de cana-de-açúcar separadas no equipamento Produtest (item 3.3.2.1), bem como as misturas entre ambas matérias primas previstas na etapa B de avaliação, foram acondicionados em embalagens hermeticamente fechadas e examinados sob microscópio eletrônico de varredura FEI (Hillsboro, EUA) modelo Quanta 400. As imagens dos componentes celulares foram obtidas em diversas ampliações as quais melhor se adequavam ao objetivo de estudo e visualização. As análises MEV foram realizadas na Unidade de Microscopia Eletrônica da UTAD.

**3.2.4.2 Espectroscopia no infravermelho próximo (NIR):** os espectros foram obtidos no modo de reflectância difusa com um espectômetro Bruker (Ettlingen, Alemanha) modelo Vector 22/N, conforme metodologias prescritas por Rials e Kelley (2002), Rials et al. (2003) e Rodrigues (2007). Para esta avaliação foram obtidos espectros das fibras de eucalipto e das partículas de cana-de-açúcar em condição natural, bem como nas misturas envolvendo percentuais de cana-de-açúcar em 5-10-15-20-25-50%.

Para as partículas de cana-de-açúcar, conforme comentado no item 3.3.2.1, foram realizadas novas classificações morfológicas do material “in natura” utilizado para a confecção dos painéis e que visam uma melhor caracterização das diferentes frações que compuseram os compósitos, buscando elementos que podem ser característicos destas menores granulometrias como, por exemplo, a possível presença de sílica nas frações finas.

As análises de caracterização, através da espectroscopia do infravermelho próximo, foram realizadas no Centro de Florestas e Produtos Florestais, do Instituto de Investigação Científica Tropical (IICT) em Lisboa-Portugal.

### 3.3 Confeção dos painéis de fibras de eucalipto e partículas de cana-de-açúcar

#### 3.3.1 Delineamento experimental e tratamentos dos painéis

As atividades de pesquisa foram desenvolvidas em 2 etapas:

**Etapa A:** foram avaliados 5 Tratamentos (Tabela 4A) referentes às porcentagens de mistura de fibras de eucalipto e partículas de bagaço de cana-de-açúcar, confeccionando-se 2 painéis/tratamento, em um total de 10 painéis.

**Etapa B:** foram avaliados 12 Tratamentos (Tabela 4B) referentes às porcentagens de mistura de fibras de eucalipto e partículas de bagaço de cana-de-açúcar e duas diferentes porcentagens de dosagem de resina uréia formol (UF, 13 e 16%), confeccionando-se 4 painéis/tratamento, em um total de 48 painéis. Na confecção dos painéis a porcentagem de bagaço variou entre 0-25%, considerando que as fibras de eucalipto constituem-se na principal matéria prima e o bagaço de cana-de-açúcar complementar.

Os estudos da Etapa A indicaram que, obrigatoriamente, as condições de prensagem para painéis acima de 25% de partículas de bagaço devem ser adequadas, com mudanças no ciclo de prensagem (temperatura, pressão e tempo), podendo interferir nas análises físico-mecânicas dos painéis.

Os resultados da análise dos painéis confeccionados nesta etapa orientaram o desenvolvimento da Etapa B, com um delineamento de valores crescentes de mistura de 5-25% de partículas de cana-de-açúcar em relação às fibras de eucalipto. A mistura máxima de 25% de fibras de cana-de-açúcar na confecção dos painéis foi definida para uma (i) caracterização detalhada dos painéis com pequenos acréscimos de matéria prima, (ii) produto adequado às normas e mercado consumidor, (iii) maior aceitação de utilização de pequenos percentuais de nova matéria prima, (iv) melhor adequação da cadeia logística de fornecimento de matéria prima e (v) passível de utilização nas atuais condições de fabricação.

As diferentes porcentagens de fibras de eucalipto e partículas de bagaço de cana, e o efeito da resina uréia formol aplicada em 2 diferentes porcentagens na confecção dos painéis, constituíram-se em delineamento inteiramente casualizado, estatisticamente analisado através de análises de variância, comparativo de médias e correlação de Pearson entre as variáveis tecnológicas na etapa A.

Tabela 4 – Tratamentos propostos para a confecção dos painéis nas etapas A e B

Etapa	Tratamento (Nº)	Fibras de eucalipto		Partículas de bagaço de cana		Resina UF	Emulsão	Painéis
		(%)	(kg/seco)	(%)	(kg/seco)	(%)	(%)	(Nº)
<b>A</b>	1	<b>100</b>	3,70	<b>0</b>	0	14	0,8	2
	2	<b>75</b>	2,78	<b>25</b>	0,93	14	0,8	2
	3	<b>50</b>	1,85	<b>50</b>	1,85	14	0,8	2
	4	<b>25</b>	0,93	<b>75</b>	2,78	14	0,8	2
	5	<b>0</b>	0	<b>100</b>	3,70	14	0,8	2
<b>B</b>	1	<b>100</b>	3,70	<b>0</b>	0	13	0,8	4
	2	<b>100</b>	3,70	<b>0</b>	0	16	0,8	4
	3	<b>95</b>	3,52	<b>5</b>	0,19	13	0,8	4
	4	<b>95</b>	3,52	<b>5</b>	0,19	16	0,8	4
	5	<b>90</b>	3,33	<b>10</b>	0,37	13	0,8	4
	6	<b>90</b>	3,33	<b>10</b>	0,37	16	0,8	4
	7	<b>85</b>	3,15	<b>15</b>	0,56	13	0,8	4
	8	<b>85</b>	3,15	<b>15</b>	0,56	16	0,8	4
	9	<b>80</b>	2,96	<b>20</b>	0,74	13	0,8	4
	10	<b>80</b>	2,96	<b>20</b>	0,74	16	0,8	4
	11	<b>75</b>	2,78	<b>25</b>	0,93	13	0,8	4
	12	<b>75</b>	2,78	<b>25</b>	0,93	16	0,8	4

### 3.3.2 Preparo das amostras de bagaço de cana-de-açúcar

#### 3.3.2.1 Classificação granulométrica

A granulometria é a propriedade física que caracteriza o tamanho das partículas do material, sendo que o estudo da granulometria do bagaço de cana-de-açúcar foi realizado pela separação do material em malhas de diferentes aberturas.

Para a confecção laboratorial dos painéis, as amostras de bagaço foram classificadas granulometricamente em equipamento vibratório marca Produtest (São Paulo, Brasil), modelo tipo G, conforme Figura 8A, aplicando-se experimentalmente malhas marca Manupen de abertura 12,0 mm; 6,3 mm; 3,15 mm, 2,0 mm e < 2,0 mm (coletor). Avaliações exploratórias de classificação granulométrica indicaram que a fração do material que passava através da peneira 3,15 mm apresenta, ainda, feixes de grande dimensão que diferem da morfologia de fibras utilizadas na confecção de painéis MDF propondo-se, portanto, a utilização de peneira de malha 2,0 mm para a segregação dos feixes (Figura 8B) e maior aproximação morfológica com a matéria prima original.

Assim, todo o material fibroso que passou na peneira de abertura 2,0 mm, e ficou retido no recipiente coletor, foi utilizado na confecção dos painéis com diferentes percentuais de bagaço e fibras de eucalipto. Esta mesma abertura (2,0 mm) foi utilizada por Widyorini et al. (2005) para seleção de partículas de bagaço de cana-de-açúcar e por Ortunõ et al. (2011) na classificação de partículas de *Arundo donax* L., espécie arbórea mediterrânea, para confecção de painéis aglomerados.

Visando a coleta de amostras para análises anatômicas e melhor separação das frações com foco em efetivo detalhamento morfológico, as amostras de bagaço retidas no coletor, após a peneira de 2,0 mm, foram submetidas à nova classificação em equipamento vibratório marca Produtest, modelo tipo T, aplicando-se experimentalmente peneiras marca Granutest com sequências de abertura em 1,0 mm; 0,59 mm; 0,259 mm e < 0,259 mm (coletor).

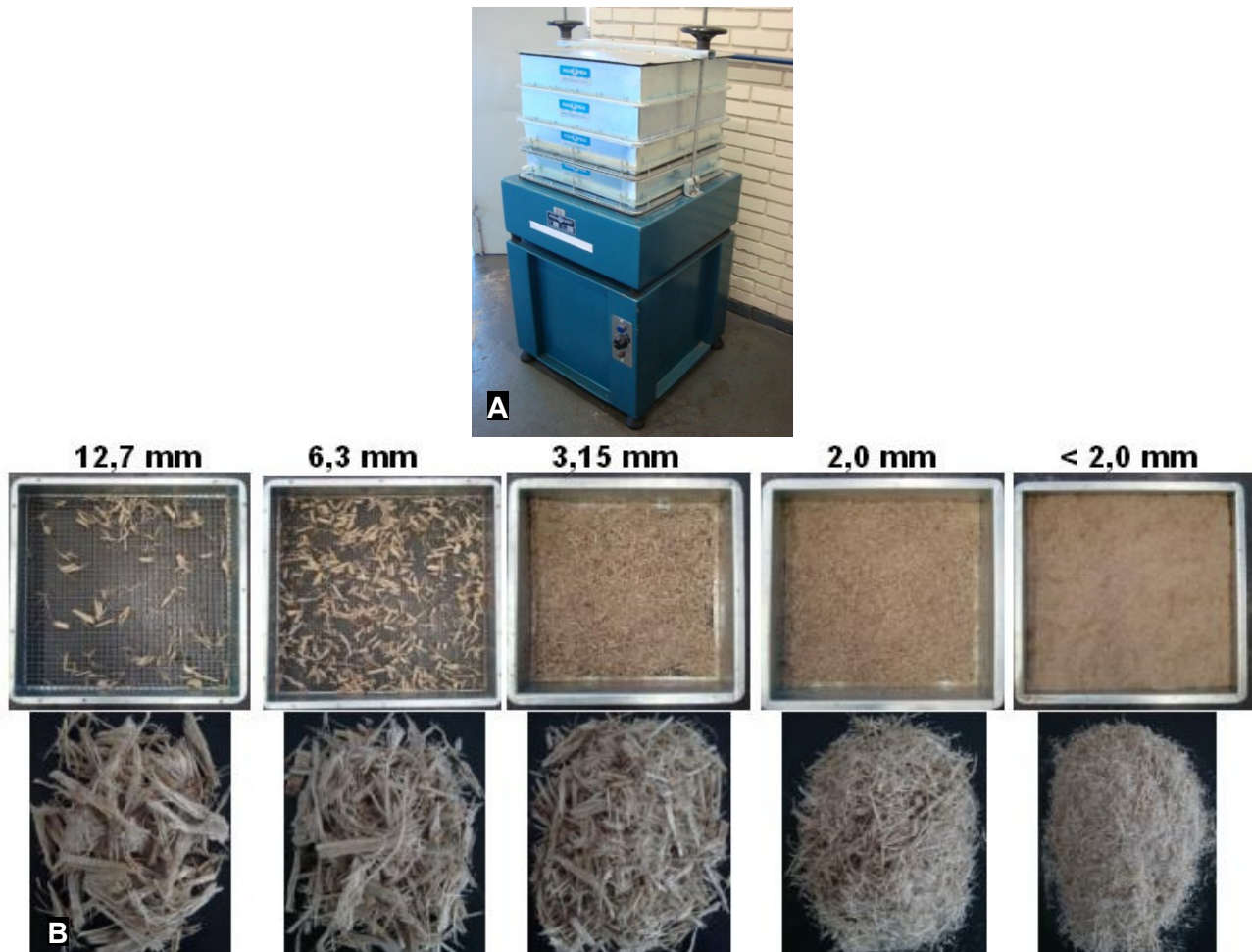


Figura 8 - (A) Equipamento Produtest para a classificação morfológica do bagaço de cana-de-açúcar; (B) Peneiras, aberturas (mm) e imagens ilustrativas da classificação morfológica das frações de bagaço de cana-de-açúcar

### **3.3.3 Preparo das amostras de fibras da madeira de eucalipto**

As amostras de fibras e demais componentes celulares da madeira de eucalipto foram coletadas após o desfibramento dos cavacos e anterior à adição dos aditivos de encolagem. As condições de desfibramento foram (i) tempo de pré-aquecimento dos cavacos = 4 min, (ii) pressão na coluna de desfibramento = 8,0 bar, (iii) pressão na caixa de discos = 8,2 bar e (iv) energia específica de desfibramento = 100 kWh/t, usuais em escala industrial para a confecção de painéis MDF.

### **3.3.4 Mistura das fibras e partículas, insumos e prensagem do colchão para a confecção dos painéis**

Após secagem das fibras de eucalipto e partículas do bagaço de cana-de-açúcar até umidade entre 2 - 3%, houve pesagem de cada quantidade de matéria prima consequente à condição a ser obtida e preparo da solução aglutinante contendo resina uréia formol (UF) e emulsão de parafina (Figura 9A). Neste ponto ressalta-se que, devido à utilização de duas diferentes dosagens de resina conforme delineamento (13% e 16%), nas encolagens que utilizaram menor dosagem (13%) havia utilização de matéria prima fibrosa com umidade próxima a 3% e nas encolagens com maior percentual de resina (16%) fibras e partículas com umidade próxima a 2%, face menor ou maior quantidade de água presente na resina amínica consequente sua dosagem.

Posteriormente, as fibras de eucalipto e partículas de cana-de-açúcar foram dispostas internamente à encoladeira (Figura 9B) e procedeu-se a mistura de ambas durante 2 minutos. Após, continuou-se o período de batelada adicionando-se resina e emulsão de parafina através de bicos com ar comprimido (Figura 9C), durante 3 minutos, procedendo-se mistura para a homogeneização da matriz fibrosa e circulação final da massa de fibras e partículas para a desagregação de possíveis grumos de cola (Figura 9D, E).

Ao final desta etapa foi obtida a umidade final do colchão de fibras e partículas, na faixa de 7%  $\pm$  0,5%, procedendo-se a adição de água em caso de necessidade de ligeiro aumento da umidade ou novo período de circulação das fibras visando a ligeira redução da umidade final.



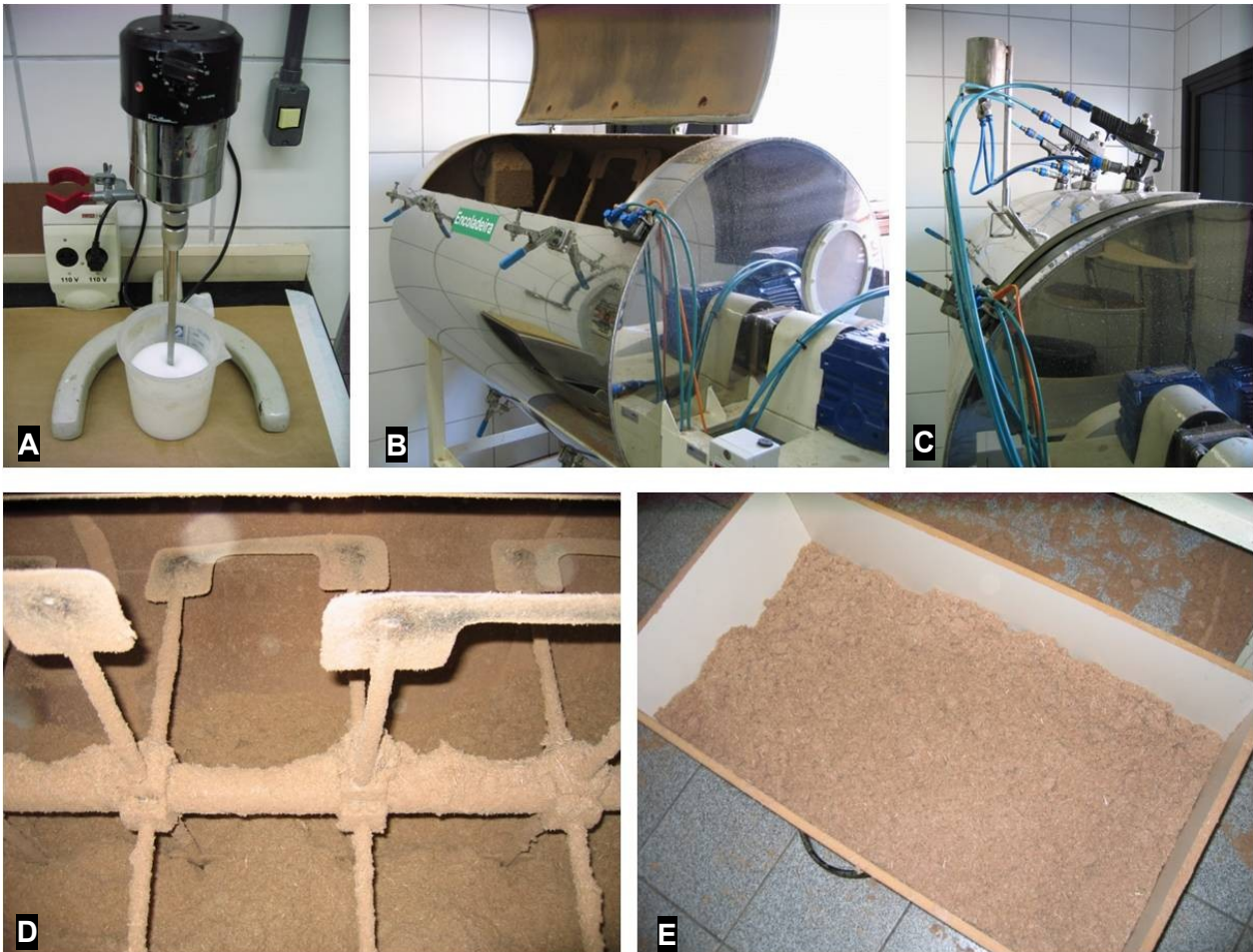


Figura 9 - Etapas da preparação do colchão de fibras + partículas. (A) mistura da resina + emulsão de parafina; (B) aspecto externo da encoladeira; (C) detalhes dos bicos aspersores por ar comprimido; (D) imagem interna da encoladeira, indicando agitadores; (E) aspecto das fibras + partículas já aglutinadas anteriormente à formação do colchão

Após, a massa de fibras e partículas foi disposta manualmente em uma caixa formadora (300 x 370 x 370 mm) conforme Figura 10A e, através de uma placa de alumínio, foi aplicada pressão manual para início da formação do colchão de fibras sendo, posteriormente, transportada a um sistema hidráulico de aplicação de pressão (Figura 10B) por 20 segundos, necessária apenas para a retirada de ar interno e atuando como uma pré-prensagem, que é etapa necessária a correta formação do colchão de fibras + partículas (Figuras 10C, D) e simula equipamento presente em escala industrial.

Em seguida, o colchão foi disposto em prensa laboratorial marca Siempelkamp (Krefeld, Alemanha), conforme Figura 10E, com ciclo de prensagem programado e composto por patamares de pressão e manutenção de um tempo em

cada estágio, mantido inalterado durante a prensagem de todos os painéis nas condições previstas em delineamento. As etapas de preparação e prensagem dos painéis foram realizadas no Laboratório de Desenvolvimento da empresa Duratex S.A. (Unidade Botucatu-SP).

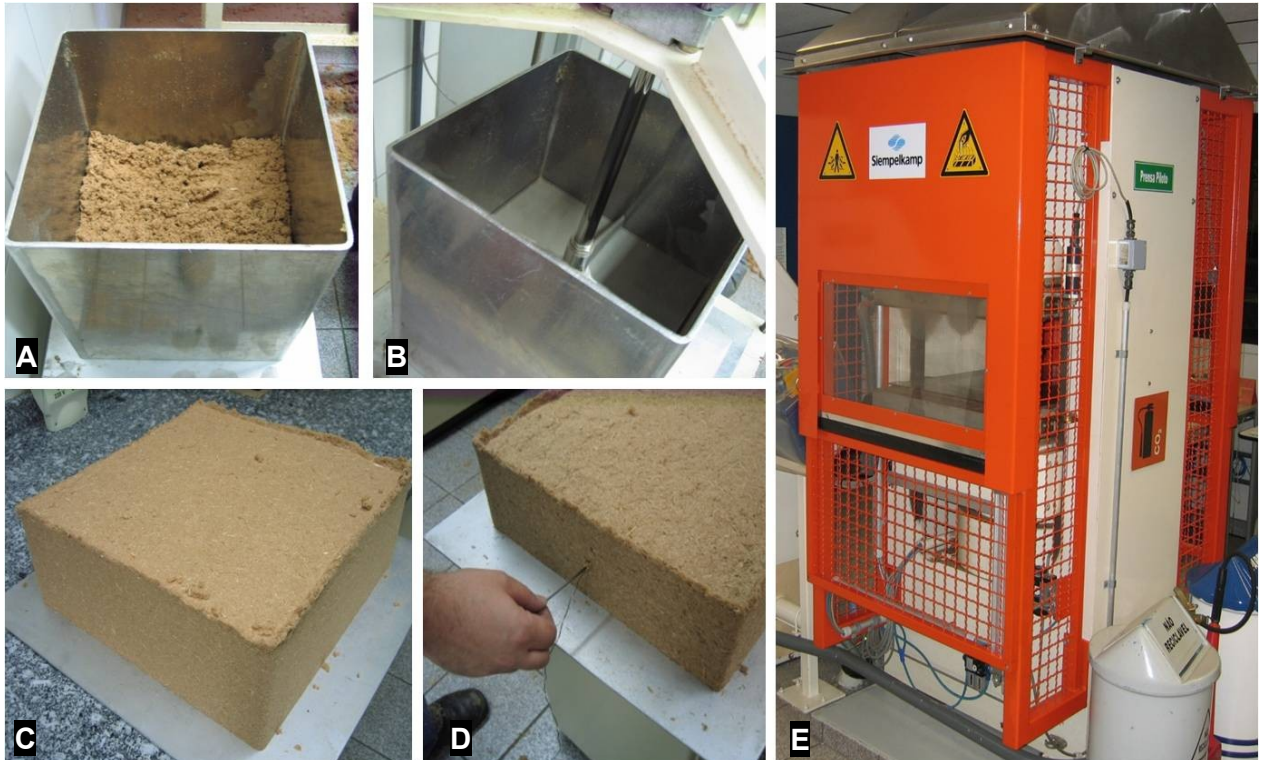


Figura 10 - Etapas da preparação para prensagem do colchão. (A) fibras + partículas encoladas dispostas em caixa de formação; (B) retirada de ar interno ao colchão (pré-prensagem); (C) imagem do colchão formado anteriormente à prensagem; (D) colocação de termopar para controle e monitoramento do ciclo de presagem; (E) aspecto da prensa laboratorial utilizada

O ciclo nominal de prensagem utilizado e o monitoramento das variáveis envolvidas estão ilustrados na Figura 11, obtida diretamente do sistema computacional de controle de prensagem. O ciclo foi 10 s para pressão de 0 a 100 N/cm<sup>2</sup>, 5 s em 100 N/cm<sup>2</sup>, 20 s para redução até 20 N/cm<sup>2</sup>, 15 s para redução até 10 N/cm<sup>2</sup>, pressão esta mantida por 50 s, aumento para 30 N/cm<sup>2</sup> em 10 s e manutenção por 40 s, com posterior redução para 0 N/cm<sup>2</sup> em 5 s.

Após a prensagem, as amostras foram climatizadas a temperatura ambiente e refiladas lateralmente com as dimensões finais de 370 x 370 mm, espessura nominal de 15,0 mm e densidade nominal de 750 kg m<sup>-3</sup>.

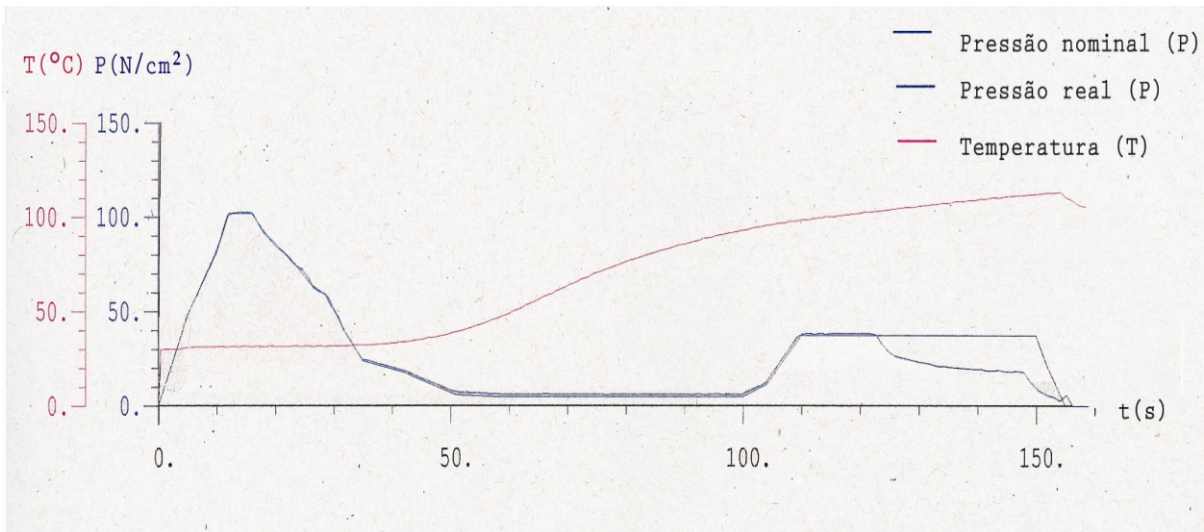


Figura 11 - Ilustração do ciclo e variáveis utilizadas durante prensagem dos painéis

A curva da temperatura representada pelo traço cor de rosa indica o gradativo aumento do seu valor, durante o processo de prensagem, atingindo 100°C no início da etapa de calibração da espessura dos painéis (de 110 até 150 s), considerada ideal para a correta transferência de calor e cura da resina amínica na região interna (centro) do painel (Figura 11).

Na região de calibração da espessura do painel observa-se, ainda, a redução da pressão real – representada pelo traço de cor azul escuro, à aproximadamente 125 s, indicativo da correta consolidação do painel e confirmada na caracterização detalhada das suas propriedades tecnológicas em todas as etapas (vide resultados das Tabelas 12, 14 e 15).

Na etapa de confecção laboratorial do painel, a umidade das fibras é uma das variáveis mais importantes, exigindo o controle e atendimento às especificações, podendo comprometer a prensagem e a qualidade tecnológica dos painéis. Em caso de **umidade elevada** formam-se bolhas com grande desprendimento de vapor, rompendo o painel normalmente na sua superfície, face elevada pressão de vapor no centro do painel, resultado da temperatura, pressão ou tempo elevados principalmente no início da prensagem.

Para evitar esse defeito deve-se reduzir a pressão no início da prensagem: aplicada para desvios de umidade de até 1,5 % do valor nominal (ex. nominal: 7,0%, limite: 8,5%). Para desvios acima de 1,5% recomenda-se rejeitar o colchão, procedendo-se a nova encolagem.

Em caso de **umidade baixa**, não há água suficiente para a condução de calor às regiões internas do painel afetando a cura da resina e ocorrendo a ruptura em sua região central, normalmente, sem desprendimento de vapor. A baixa umidade, em algumas situações, causa baixa densificação do painel, com deformidade na região central do perfil de densidade.

É comum verificar queda dos picos de densidade, podendo resultar em resistência superficial baixa e porosidade no processo de lixamento. Para evitar este defeito são efetuados acréscimos nas pressões no início da prensagem, para desvios de umidade de até 1,5 % abaixo do valor nominal (ex. nominal: 7,0%, limite: 5,5%). Para desvios abaixo de 1,5% recomenda-se rejeitar o colchão, procedendo-se a nova encolagem.

### 3.3.5 Insumos utilizados na confecção dos painéis

A resina utilizada para a aglutinação das fibras e partículas foi a uréia formol (UF), fornecida pela GPC Química S/A e usual na confecção de painéis MDF, cujo motivo de escolha foi detalhado no item 2.8.1 e os principais resultados de características químicas, que estavam de acordo com o especificado em boletim técnico do fornecedor, são descritos na Tabela 5.

Tabela 5 - Características da resina uréia formol (UF) utilizada na confecção dos painéis

Variáveis	Unidade	Resultado
Viscosidade brookfield	cP	350
pH	--	8,6
Gel time	s	50
Teor de sólidos	%	65
Densidade	g cm <sup>-3</sup>	1,28

A emulsão de parafina utilizada foi fornecida pela Isogama Indústria Química Ltda, de caráter comercial e usual para a confecção de painéis MDF, com características descritas na Tabela 6, e que estavam de acordo com o boletim técnico de produto.

Tabela 6 - Características da emulsão de parafina utilizada na confecção dos painéis

Variáveis	Unidade	Resultado
Viscosidade CF 4	s	30
pH	–	10
Teor de sólidos	%	70

As etapas de obtenção do bagaço de cana-de-açúcar e sua caracterização morfológica em peneiras; da obtenção das fibras de eucalipto e da confecção dos painéis com partículas de cana-de-açúcar, eucalipto e sua mistura são apresentadas na Figura 12.

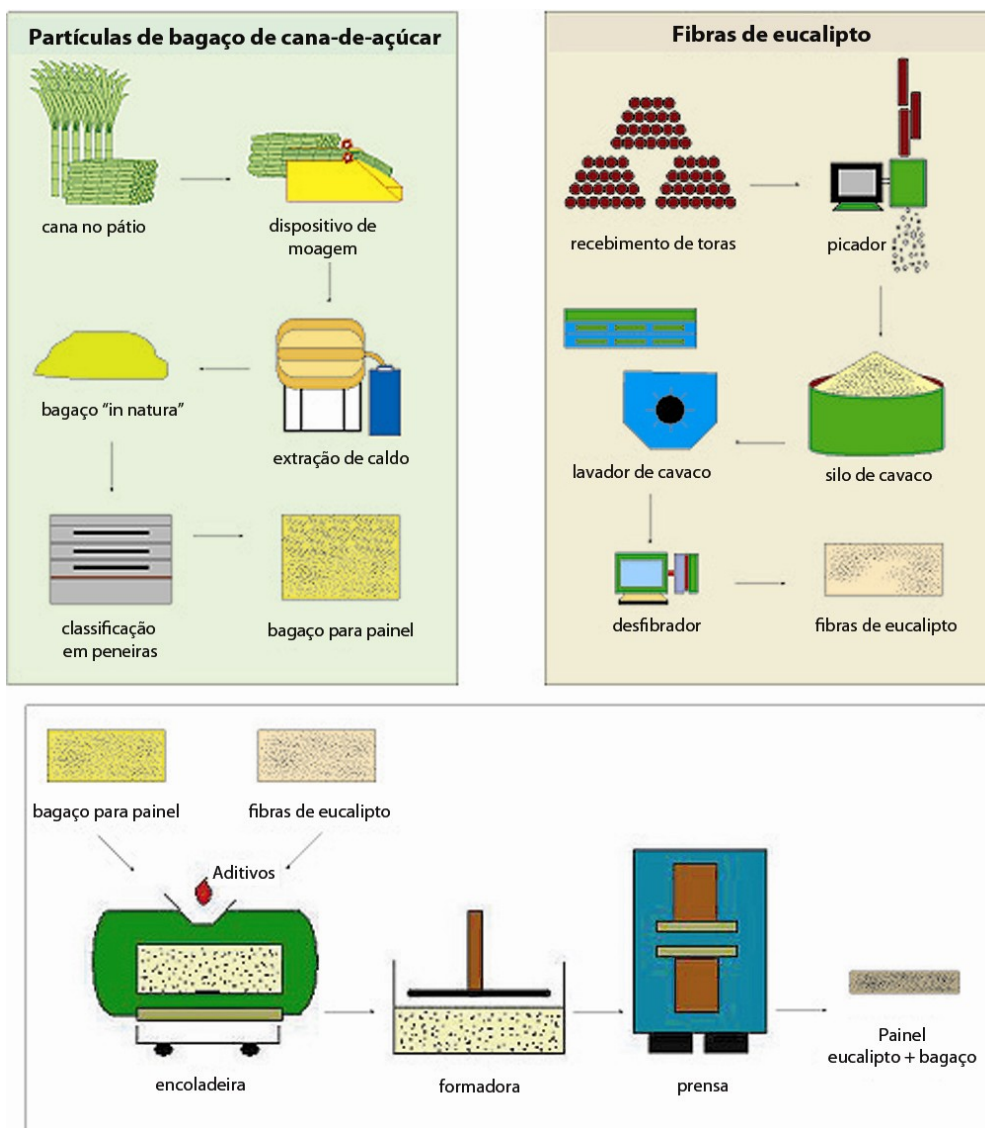


Figura 12 – Etapas da obtenção das partículas de bagaço e fibras de eucalipto, sua mistura e confecção dos painéis

### **3.4 Caracterização dos painéis de fibras de eucalipto e partículas de cana-de-açúcar**

#### **3.4.1 Caracterização dos perfis de densidade por atenuação de raios X**

Os perfis para caracterização da densidade ao longo da espessura dos painéis foram obtidos no densitômetro GreCon (Hannover, Alemanha) modelo DA-X, e no densitômetro Joyce Loebel (Gateshead, Inglaterra) modelo 3CS, para fins de comparação entre as metodologias.

**3.4.1.1 Densitômetro GreCon DA-X:** é utilizado no âmbito industrial e laboratorial e constitui-se de aparelhagem padrão na obtenção e interpretação do perfil densitométrico de painéis de fibras e partículas.

Para cada tratamento, foram demarcados e cortados os corpos-de-prova (50 x 50 mm), mantidos em câmara de climatização (temperatura-T = 20°C e umidade relativa-UR = 60%) e, em seguida, analisados em equipamento GreCon modelo DA-X. A Figura 13 ilustra o equipamento (Figura 13A), as etapas de corte das amostras (Figuras 13B, C), a disposição no porta amostra e início da leitura do perfil ao longo da espessura (Figura 13D, E) e a ilustração de um perfil experimental (Figura 13F) em saída computacional.

Para a etapa A (painéis com teores de 0-25-50-75-100% de partículas de cana-de-açúcar, com 14% de resina) foram obtidos 3 perfis de densidade aparente ao longo da espessura para cada tratamento, totalizando 15 perfis. Nesta etapa, para cada tratamento foi obtida experimentalmente uma imagem de raios X digital no equipamento Faxitron (Lincolnshire, USA) modelo MX-20, pertencente ao Laboratório de Sementes do Departamento de Produção Vegetal ESALQ/USP, utilizando amostras de painéis nas dimensões 3 x 15 x 40 mm.

Para a etapa B (painéis com teores de 0-5-10-15-20-25% de partículas de cana-de-açúcar), foram obtidos 6 perfis de densidade aparente ao longo da espessura para cada tratamento, nas dosagens de resina 13% e 16%, totalizando 72 perfis.

Como dados quantitativos dos perfis, foram obtidos os valores de: (i) densidade máxima (média entre as faces superior e inferior); (ii) densidade média e (iii) densidade mínima, conforme Figura 14.

Durante a obtenção dos perfis densitométricos, o equipamento apresentou as seguintes características: voltagem de 33 kV, corrente entre 0-1 mA, ângulo de radiação de 11°, colimação inicial e final dos feixes de 100 e de 50  $\mu\text{m}$ , respectivamente. No presente experimento foi utilizado o equipamento da empresa Duratex S.A., em Botucatu-SP.

**3.4.1.2 Densitômetro Joyce Loeb:** amostras de painéis (4 x 15 x 40 mm; espessura-largura-comprimento) foram fixadas em suporte e cortadas em dupla-serra circular paralela (Figura 15A, B); mantidas em sala de climatização e dispostas em suporte e expostas à fonte de raios X (voltagem de 12 Kv, intensidade de corrente de 18 mA, 250 s exposição) (Figura 15D) sobre filmes de raios X (Figura 15C) Kodak Industrex CX. Os filmes foram revelados (2 min.) e fixados (2 min.) à temperatura de 20° C, em tanques com revelador Kodak LX24 e fixador Kodak AL4.

Os perfis de densidade foram obtidos em densitômetro Joyce Loeb modelo 3CS (Figura 15E), com leituras a cada 100  $\mu\text{m}$  da imagem radiográfica, obtendo-se cerca de 150 leituras. Cartões de perfuração foram obtidos no equipamento 1110 Data Dynamics e lidos no equipamento Teletype (Figura 15F), sendo os valores de densidade ótica convertidos em densidade real através de equação de regressão linear entre duas densidades obtidas dos padrões. Após a análise computacional obteve-se a planilha com os dados de densidade ( $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ) para as amostras dos painéis, com 3 leituras por amostra/tratamento (LOUZADA, 2000).

Para a obtenção dos padrões de densidade, similarmente à utilização de acetato de celulose como padrão em microtomografias de amostras de madeira, foram obtidas 4 amostras de painéis MDF comerciais nas dimensões 4 x 12 x 60 mm (espessura-largura-comprimento, respectivamente), seccionadas no sentido longitudinal dos painéis em diversos locais ao longo de sua espessura para abranger as variações de densidade ao longo de sua espessura, e ilustradas com disposição central na Figura 15C.

As análises foram realizadas no Laboratório de Produtos Florestais da UTAD e utilizaram apenas painéis confeccionados na Etapa B, face disponibilidade amostral.

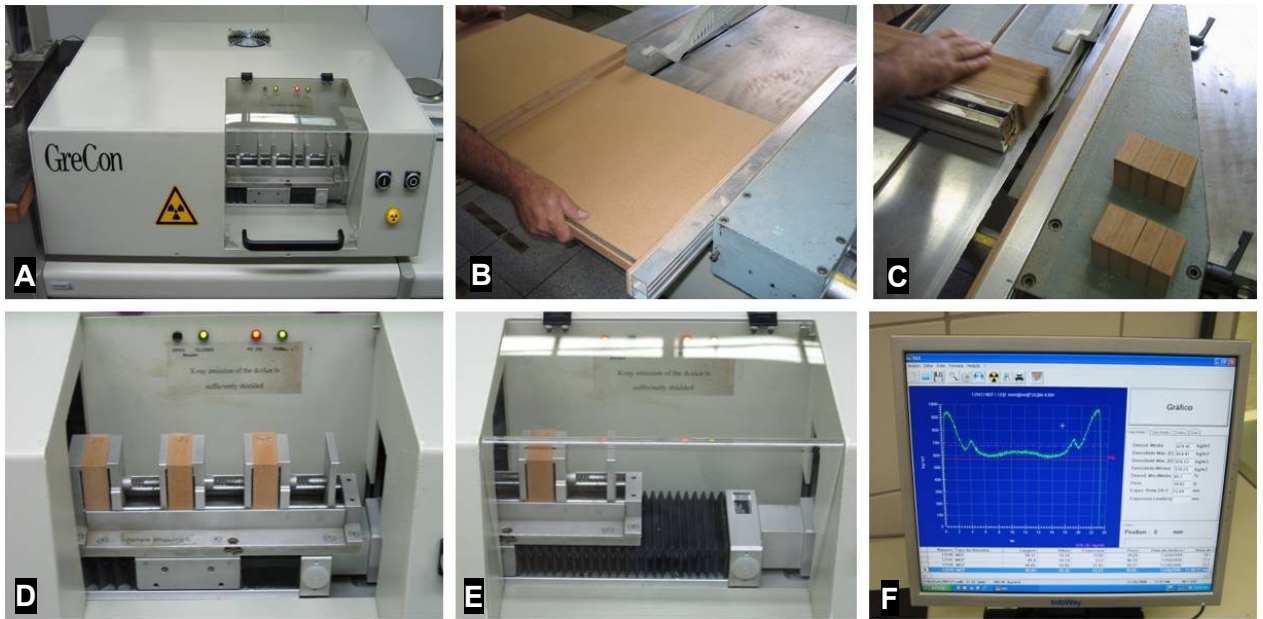


Figura 13 - Obtenção do perfil de densidade dos painéis por densitometria de raios X. (A) densitômetro de raios X GreCon DA-X; (B e C) corte dos corpos de prova dos painéis; (D) corpos de prova dispostos no porta-amostra; (E) deslocamento do suporte para a câmara de leitura; (F) perfil e valores de densidade aparente do painel (adap. Belini et. al., 2009)

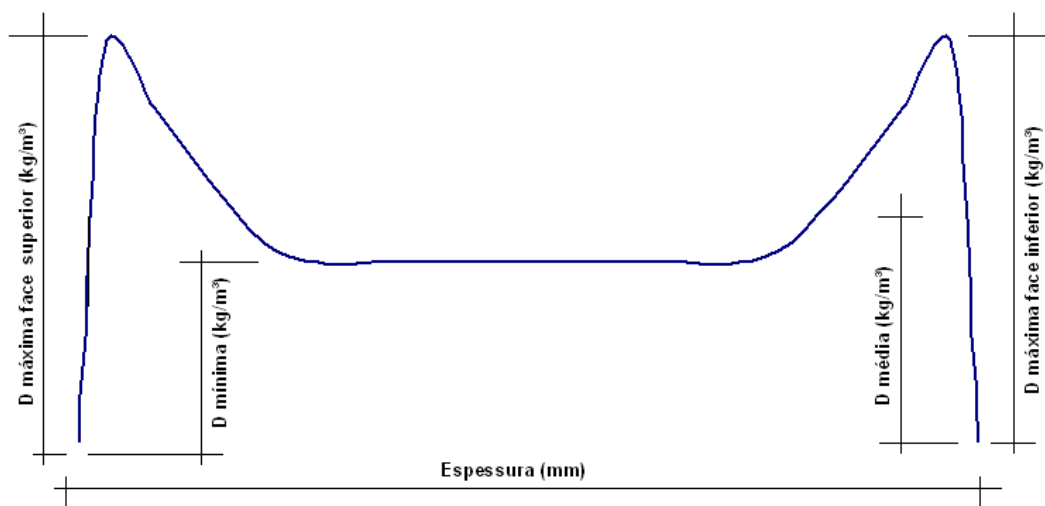


Figura 14 – Parâmetros quantitativos de densidade avaliados no perfil densitométrico (adap. Belini et al., 2009)



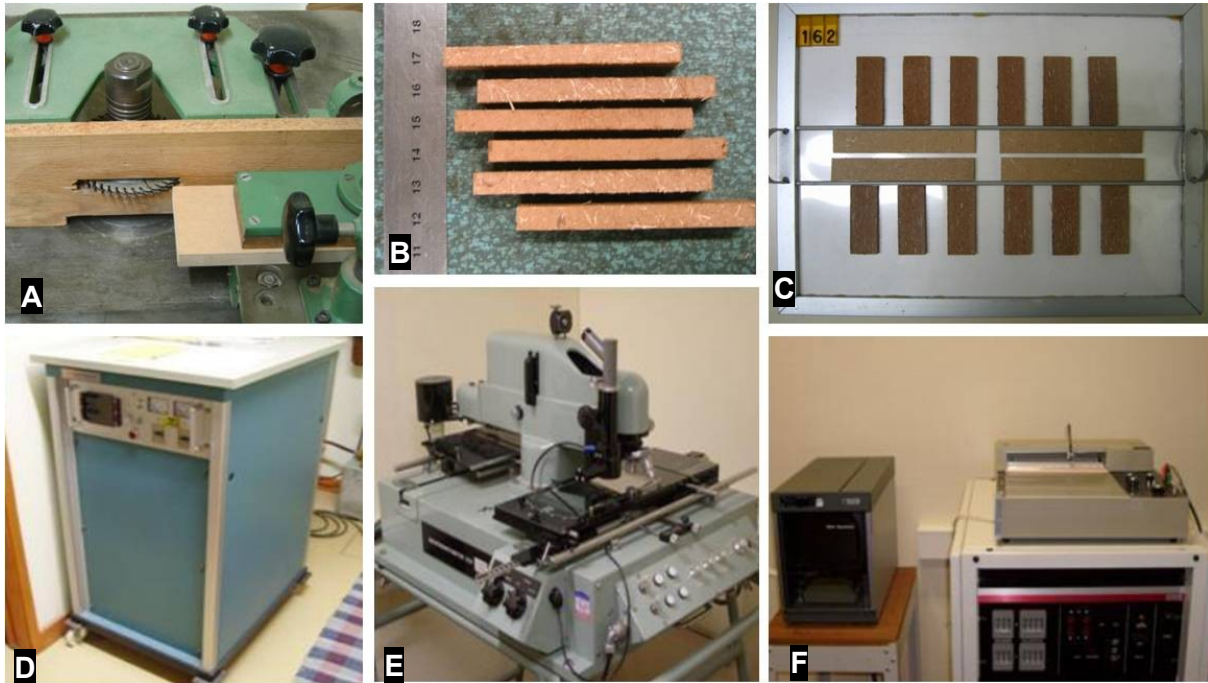


Figura 15 – Obtenção do perfil: (A) corte em serra dupla circular; (B) aspecto das amostras após corte; (C) disposição das amostras para obtenção de película; (D) equipamento para irradiação das amostras; (E) densitômetro Joyce LoebL; (F) saída dos valores de densidade ótica em fita perfurada e traçador de gráficos

### 3.4.2 Caracterização por espectroscopia no infravermelho próximo (NIR)

Espectros foram medidos no modo de reflectância difusa com um espectrômetro Bruker (Ettlingen, Alemanha) modelo Vector 22/N. Este espectrômetro com transformada de Fourier é projetado para análise da reflexão de sólidos com uma esfera integradora de diâmetro da área medida = 10 mm. A análise espectral foi realizada dentro da faixa de  $12.500$  a  $3.500$   $\text{cm}^{-1}$  (800 a 2850 nm) com resolução de  $8$   $\text{cm}^{-1}$ .

Para cada um dos 12 tratamentos da etapa B (conforme Tabela 4) foram preparadas 6 amostras nas dimensões  $15 \times 50 \times 50$  mm (total de 72 amostras) para obtenção de espectros do material sólido em três diferentes posições da amostra, conforme Figura 16: (i) superfície de prensagem; (ii) face lateral e (iii) face lateral após lixamento manual (lixa de grana 300 por 45 segundos). Foram realizadas um total de 7 leituras em cada amostra: 3 na superfície de prensagem; 2 na face lateral e 2 na face lateral após lixamento. Portanto, um total de 504 espectros (scan de 16 segundos) foram obtidos para as amostras sólidas após climatização (temp. =  $20^\circ\text{C}$  e UR = 60%), com peso constante.

Análise de Componentes Principais (PCA), Mínimos Quadrados Parciais (PLS) e Análise Discriminante (PLS-DA) foram realizadas com auxílio do software Unscrambler (CAMO AS, Noruega) para descrever a relação entre os espectros NIR e conteúdo de bagaço de cana-de-açúcar nos painéis.

As análises foram realizadas no Laboratório de “Production et Valorisation des Bois Tropicaux”, do Centre Internationale de la Recherche Agronomique pour le Developpment (CIRAD), em Montpellier, França.

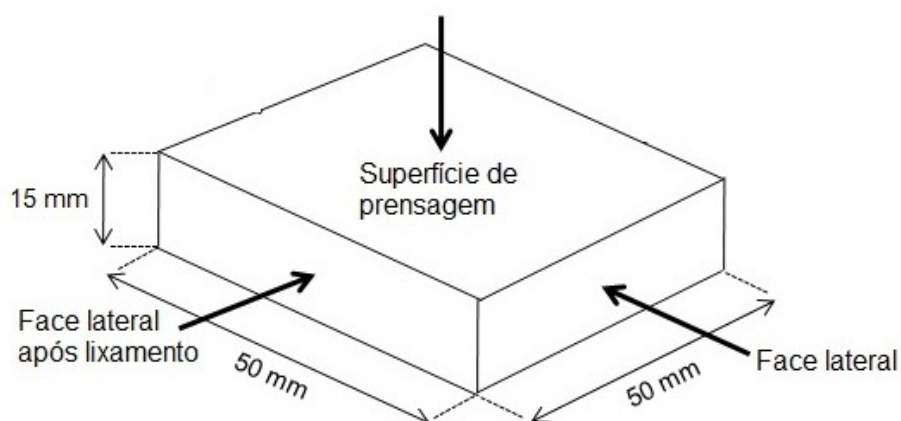


Figura 16 – Dimensões da amostra de painel e orientação para a obtenção dos espectros NIR (adap. Belini et al., 2011)

### 3.4.3 Caracterização das propriedades físico-mecânicas

Na etapa A, do total de 2 painéis (15 x 370 x 370 mm) confeccionados em cada tratamento proposto, 1 painel de cada tratamento foi utilizado para produção dos corpos de prova visando os ensaios de caracterização tecnológica (Figura 17). Na etapa B, do total de 4 painéis (15 x 370 x 370 mm) confeccionados em cada tratamento proposto, houve seleção casualizada de 3 painéis de cada tratamento para produção dos corpos de prova visando os ensaios de caracterização tecnológica (Figura 17).

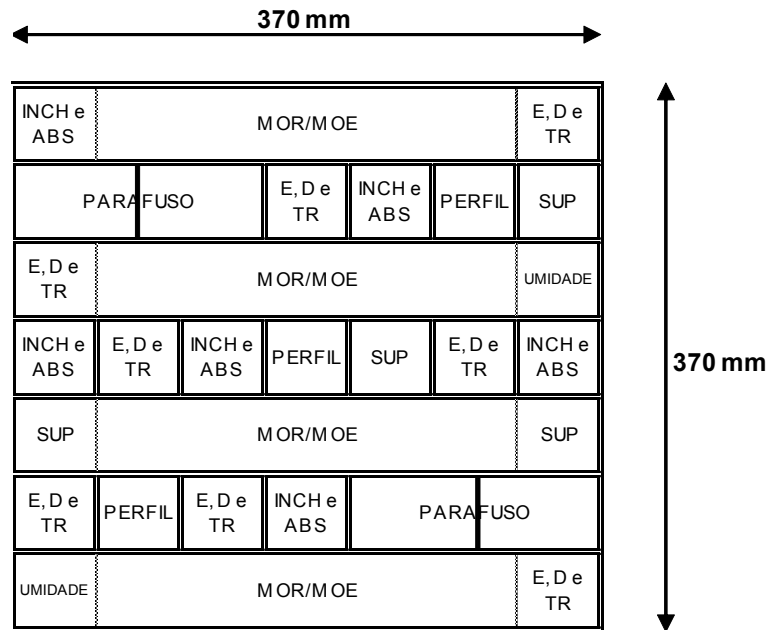


Figura 17 – Painéis: amostragem dos corpos de prova para os ensaios de qualidade tecnológica

A caracterização das propriedades físico-mecânicas contemplou a análise das seguintes variáveis tecnológicas:

**Perfil de densidade - PERFIL:** amostras de painéis (50 x 50 mm) foram analisadas por atenuação de raios X determinando-se a sua densidade média e o gradiente de variação ao longo da espessura.

**Espessura – E (mm):** amostras de painéis (50 x 50 mm) no mesmo corpo de prova para as avaliações, em sequência, de: (1) espessura; (2) densidade e (3) resistência à tração perpendicular ao plano. A espessura foi determinada através de leitura em paquímetro digital, no centro do corpo de prova.

**Densidade – D ( $\text{kg m}^{-3}$ ):** amostras de painéis (50 x 50 mm), onde é verificada a relação entre o peso do corpo de prova (kg) pelo volume do mesmo ( $\text{m}^3$ ). Esta variável é influenciada pela quantidade de material utilizado no painel, umidade, dosagem de resina e espessura final, sendo que a variação dentro de um mesmo painel é determinada nas etapas de formação e prensagem do colchão.

**Resistência à tração perpendicular ao plano - TR ( $\text{N mm}^{-2}$ ):** amostras de painéis (50 x 50 mm) submetidas a força de tração aplicada perpendicularmente à sua

superfície até a ruptura, que normalmente ocorre na linha central ao longo de sua espessura. A resistência da camada interna reflete a facilidade ou dificuldade com que o painel pode delaminar. Uma elevada resistência à tração é fundamental quando usado em várias aplicações do mobiliário, mas especialmente quando os cantos são trabalhados (usinados) ou na junção de vários componentes em móveis.

**Resistência superficial** - SUP ( $\text{N mm}^{-2}$ ): amostras de painéis (50 x 50 mm) foram submetidas à força de tração aplicada perpendicularmente ao plano de sua face, promovendo o arrancamento de determinada área da sua camada superficial. Influenciam esta variável a densidade, correta formação do colchão, ciclo de prensagem e dosagem de resina.

**Módulo de elasticidade** – MOE ( $\text{N mm}^{-2}$ ): amostras de painéis (50 x 350 mm, vão de 300 mm) foram submetidas à aplicação de força em seu centro para determinação de constante que expressa a rigidez durante o regime elástico, onde não há alteração de suas características originais, e para determinação da

**Resistência à flexão estática** – MOR ( $\text{N mm}^{-2}$ ): com amostras de painéis submetidas à força aplicada em seu centro até a ruptura. O encurvamento de prateleiras, tampos de mesa, estantes ou outras superfícies planas com apoio nas extremidades, e que estejam sustentando alguma carga, é determinado através de suas dimensões, da carga aplicada e do módulo de elasticidade do material utilizado para a confecção do elemento.

**Resistência ao arrancamento de parafuso** - PARAFUSO (kgf): amostras de painéis (50 x 70 mm) foram submetidas ao arrancamento de parafuso na sua superfície e topo, para verificação da resistência. A capacidade de segurar parafusos, em ambas as faces e bordas, é um importante atributo para materiais à base de madeira, utilizados na produção de móveis e acessórios (rodapés, molduras) e está relacionada à densidade do material e dosagem de resina utilizada.

**Inchamento em espessura** - INCH (%): amostras de painéis (50 x 50 mm), do mesmo corpo de prova para determinação de absorção, são imersas em água (24 h; 20°C) avaliando-se o seu incremento em espessura. Os painéis de fibra, quando

utilizadas em condições de umidade normal, apresentam menor inchamento que outros tipos de painéis standard, como o aglomerado, por exemplo.

**Absorção** – ABS (%): amostras de painéis (50 x 50 mm) imersas em água (24 h; 20°C) determinando-se o seu aumento em massa.

**Teor de umidade** – UMIDADE (%): amostras submetidas à secagem em estufa para determinação do teor de umidade dos painéis no momento dos ensaios. Tem influência direta na espessura dos painéis e, conseqüentemente, nos valores das propriedades, além de influenciar no comportamento dimensional e nas características de acabamento superficial.

Na etapa A, para cada um dos 5 tratamentos, foram realizadas 8 determinações de densidade, resistência à tração perpendicular, 6 determinações de inchamento e absorção; 4 determinações de MOR, MOE, resistência à tração superficial e arrancamento de parafuso (face e topo); 3 determinações do perfil de densidade e 2 determinações de umidade.

Na etapa B, para cada um dos 12 tratamentos, foram realizadas 24 determinações de densidade e de resistência à tração perpendicular; 18 determinações de inchamento e absorção; 12 determinações de MOR, MOE, resistência à tração superficial e arrancamento de parafuso (face e topo); 9 determinações do perfil de densidade e 6 determinações de umidade.

As análises foram realizadas em equipamento de ensaios universal servo-controlado marca IMAL (Modena, Itália), da na empresa Duratex S.A. Unidade Botucatu-SP. Os ensaios de caracterização tecnológica dos painéis atenderam à norma ABNT NBR 15316-3 (2006c) – Painéis de Fibra de Média Densidade – Parte 3: Métodos de Ensaio.

#### **3.4.3.1 Caracterização por análises óticas (deflectometria)**

**Preparação das amostras:** foram avaliados vários produtos de revestimento para a obtenção de superfície dos painéis altamente refletiva para os ensaios de deflectometria, aplicados como (i) produtos selantes para evitar a absorção da tinta pelas fibras do painel; (ii) processo de lixamento e grana de lixas para o preparo da

superfície para a pintura; (iii) aplicação de tinta spray, à base de água e solvente, conferindo fundo negro e (iv) aplicação de vernizes, à base de água e solvente, catalisadores e tempo de cura para conferir superfície vítrea ao painel.

Os melhores resultados foram obtidos pela (i) aplicação de massa seladora com espátula e secagem por 24 h; (ii) lixamento com grana 400 e (iii) aplicação manual de spray esmalte sintético negro fosco e secagem por 24 h. Porém, a etapa final e mais crítica (obtenção de superfície vítrea) tornou-se inviável nas inúmeras aplicações e combinações de vernizes, devido a incompatibilidade com o esmalte sintético, dificuldade de aplicação devido a baixa viscosidade, grande período de cura sobre placa de vidro que proporciona a lisura necessária e dificuldade de descolamento do vidro com vários tipos de desmoldantes utilizados, desde produtos industriais como alternativos.

A aplicação de resina epóxi Surf Clear® (utilizada na confecção de pranchas de windsurf), indicada por Kim et al. (2007) para recobrimento de polímeros e placas metálicas de fina espessura, mostrou-se efetiva. A metodologia preconizada para o preparo da superfície de painéis e madeira sólida para os ensaios de deflectometria consta do (i) lixamento da superfície dos painéis com lixa grana 240 para retirada da camada pré-curada existente e pequenas imperfeições presentes (Figura 18A); (ii) aplicação, com espátula metálica, de massa para selar a superfície e evitar a absorção do esmalte sintético pelas fibras, e secagem por 24 h; (iii) lixamento com grana 400 removendo-se a maioria da massa aplicada e imperfeições causadas (Figura 18B); (iv) aplicação manual de spray esmalte sintético preto fosco, em uma única camada. Aplicar no painel posicionado verticalmente e, imediatamente à aplicação, posicioná-lo horizontalmente para evitar escorrimentos da tinta, deixando secar por 24 h; (v) aplicação da resina epóxi Surf Clear® na proporção 3:1 (resina:catalisador). Deve haver excesso de resina para uma correta aplicação, assim atentar para aplicação de desmoldante também na face inferior do painel; (vi) colocar placa de vidro (4 ou 5 mm de espessura), previamente com aplicação de desmoldante (cera de abelha), sobre a resina. Exercer certa pressão para a retirada de pequenas bolhas e correto espalhamento em toda a superfície; (vii) sobrepor um peso distribuído em toda a superfície para manter correta fixação entre a placa de vidro e a resina, de modo a obter excelente vitrificação; (viii) aguardar cura por cerca de 3 dias a uma temperatura de 20°C e UR 60%; (ix) retirada cuidadosa da placa de vidro (Figura 18C) através da inserção de objeto cortante junto a uma das bordas do

vidro; (x) descolamento gradual evitando imperfeições na superfície refletiva do painel (Figura 18D).

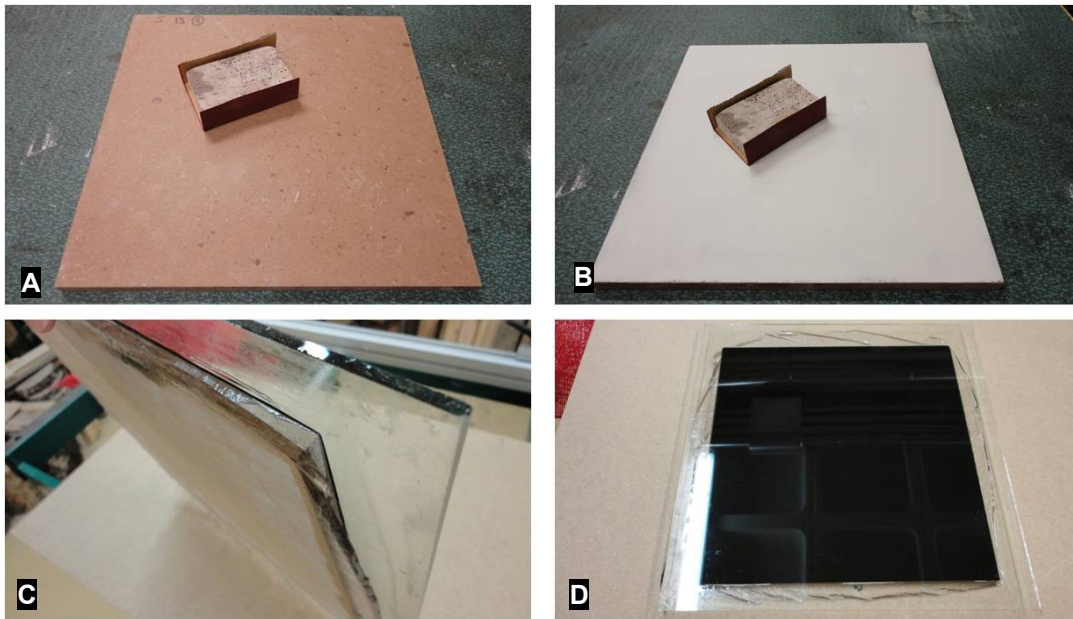


Figura 18 – Obtenção de superfície refletiva. (A) painéis após lixamento; (B) painéis após aplicação de massa selante e lixamento; (C) retirada da placa de vidro após cura da resina epóxi; (D) painel com superfície altamente refletiva

**Preparação do set up foto-mecânico:** para o teste de flexão os painéis foram fixados em 3 pontos de suas extremidades (Figura 19A) sendo aplicada a força por 1 célula de carga de 5 kN (500 kg) fixada em uma relação linear (Figura 19C) com um sistema de avanço manual de carregamento de 0,08 mm por meio de parafuso rotativo. A carga foi aplicada no sentido perpendicular nas 4 extremidades centrais do painel (carga 1, 2, 3, 4) (Figura 19B) registrando o valor em sistema de aquisição de dados.

Face dimensão dos painéis (370 x 370 mm) imprimiu-se em papel A0 (841 x 1149 mm) uma grade (grid de 6 mm), fixada em suporte rígido no sentido vertical (Figura 19B) a 2810 mm de distância do sistema de suporte dos painéis. No centro da grade abriu-se um orifício com diâmetro de 25 mm para a câmera digital captar o movimento dos painéis após reflexão na grade, utilizando luz branca LED Raylux para a iluminação uniforme da grade (Figura 19B). Coletou-se uma imagem fotográfica da grade, refletida na superfície do painel, com uma câmera Baumer modelo FWX20 (resolução 1624x1236 pixels) com lente Nikon 28-105 f/3.5-4.5D (Figura 19D).

As análises de deflectometria foram realizadas no Laboratório de Técnicas Óticas do Departamento de Engenharia Mecânica da UTAD, visando a caracterização ótica das propriedades elásticas dos painéis, principalmente o módulo de elasticidade (MOE).

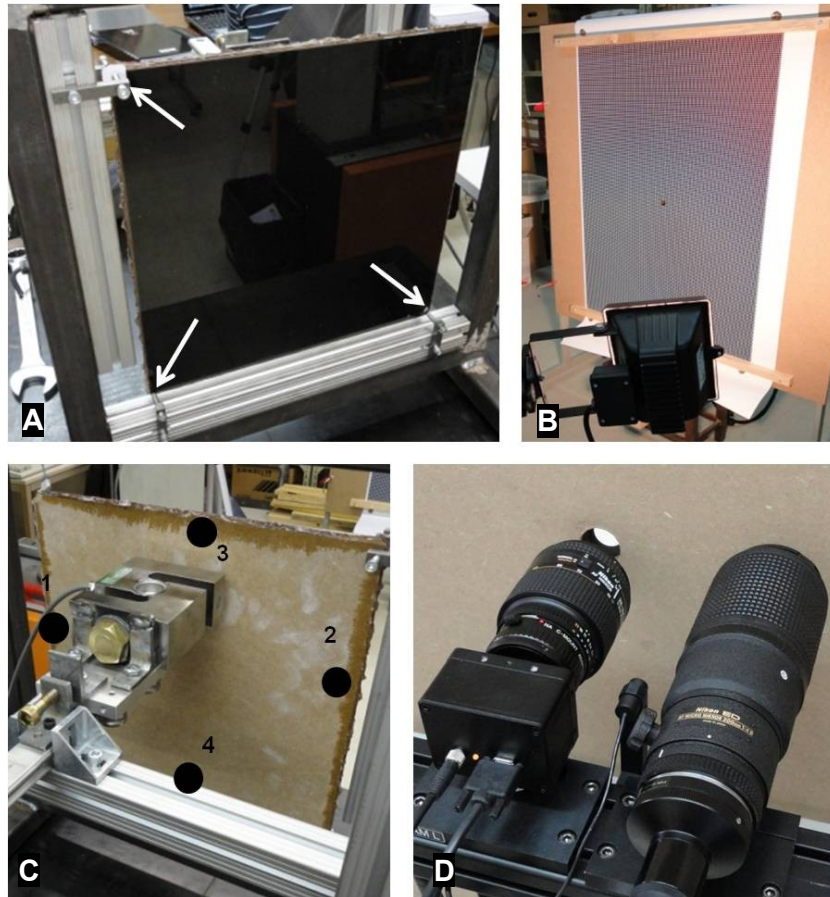


Figura 19 – Sistema de ensaio foto-mecânico. (A) painel fixado em 3 pontos (setas); (B) grade fixada em suporte vertical com sistema de iluminação; (C) célula de carga e pontos de aplicação; (D) orifício no painel de suporte da grade e câmera para captação de imagens

#### 3.4.4 Caracterização química (teor de sílica e de formol livre)

Os ensaios para determinação dos teores de sílica e de formol livre dos painéis foram realizados conforme norma ABNT NBR 15316-3 (2006c) – Painéis de Fibra de Média Densidade – Parte 3: Métodos de Ensaio, e determinadas no Laboratório de Desenvolvimento da empresa Duratex S.A. Unidade Agudos-SP.

**Teor de sílica (%)** – dos corpos de prova utilizados para as avaliações de MOR e MOE, em cada tratamento, foram obtidos 200 g de painéis (15 x 25 x 25 mm) para a determinação do teor de sílica (impurezas minerais). A presença do mineral foi



identificada por imagens MEV e caracterizada quimicamente por análise elementar em EDS (Energy Dispersive Spectroscopy) acoplada ao MEV.

**Formol livre** (mg/100g) - dos corpos de prova utilizados para as avaliações de MOR e MOE, em cada tratamento, foram obtidos 100 g de painéis (15 x 25 x 25 mm) para a determinação do teor de formol livre pelo método de extração “perforator”.

Na etapa A, para os 5 tratamentos, foi realizada 1 determinação do teor de sílica e 1 do teor de formol livre, totalizando 5 determinações do teor de sílica e 5 de formol livre. Na etapa B, para os 12 tratamentos, foi realizada 1 determinação do teor de sílica e 1 determinação do teor de formol livre, totalizando 12 determinações do teor de sílica e 12 do teor de formol livre.

### **3.4.5 Caracterização da durabilidade biológica (bioensaios)**

**3.4.5.1 Resistência ao ataque de cupins:** foram cortadas 3 amostras de painéis (15 x 40 x 40 mm)/tratamento considerando as porcentagens de partículas de cana-de-açúcar (0- 5-10-15-20-25%) e porcentagens de resina uréia formol (13-16%), em um total de 36 amostras (12 tratamentos), adicionando-se 3 amostras (15 x 20 x 40 mm) de madeira de *Pinus sylvestris* como testemunha. Em vasos de vidro com 100 g de areia e 25 ml de água foram colocados anéis de acrílico e, no seu interior, 250 operários, 5 soldados e 4 ninfas de cupins da espécie *Reticulitermes santonensis* (total de 9.984 cupins) e transportados para sala climatizada (27°C; 70% UR; 48 h) para a aclimação dos cupins.

As amostras de painéis e de madeira sólida foram colocados sobre o anel acrílico (1 amostra/recipiente), de acordo com as normas AFNOR EN 117 (2005) e os conjuntos mantidos em câmara climatizada (27°C, 70% UR) por 8 semanas, quando foi registrado o número de operários, soldados e ninfas vivos (% de sobrevivência), avaliando visualmente os corpos de prova (sistema de classificação padrão; AFNOR EN 117, 2005) (Tabela 7) e acondicionados em sala climatizada (20° C; 65% UR) até massa constante, para pesagem e determinação da perda de massa (Eq. 1). O ensaio é considerado válido quando a severidade do ataque de 3 amostras de painéis corresponder ao nível 4 (Tabela 7) e a % de sobrevivência dos cupins for superior a 50%.

$$PM = 100 * \frac{(Pi - Pf)}{Pi} \dots\dots\dots (1)$$

Onde: PM: perda de massa (%); Pi: peso inicial (g); Pf: peso final da amostra (g)

Tabela 7 – Classificação e indicação da severidade do ataque de cupins (adap. AFNOR EN 117, 2005)

Classificação	Severidade do ataque
0	nenhum ataque
1	tentativa de ataque
2	ligeiro ataque
3	médio ataque
4	forte ataque

**3.4.5.2 Resistência ao ataque de fungos:** foram cortadas 3 amostras de painéis/tratamento (15 x 40 x 40 mm) em um total de 36 amostras para os 12 tratamentos e mais 16 amostras (6 amostras nas dimensões 15 x 40 x 40 mm e 10 amostras nas dimensões 15 x 20 x 40 mm) de madeira de *Fagus sylvatica* como testemunha. Os tratamentos compreenderam as porcentagens de partículas de cana-de-açúcar (0-5-10-15-20-25%) e de resina uréia formol (13-16%).

Nos ensaios utilizou-se a espécie *Pleurotus ostreatus*, basidiomiceto de podridão branca e classificado como obrigatório na avaliação dos painéis segundo a norma AFNOR ENV 12038 (2003). O fungo *Coriolus versicolor*, também de podridão branca, apresenta indicação similar para a avaliação de painéis confeccionados exclusivamente com madeira de folhosas.

Após 16 semanas de incubação (21°C; 70% UR) removeu-se o micélio do fungo da superfície das amostras dos painéis, secos e determinada a porcentagem de perda de peso (Eq. 1). O ensaio é considerado válido quando a severidade do ataque for superior a 20%. As amostras de painéis com perda de massa inferior a 3% são considerados muito resistentes; se a perda de massa média foi superior a 3% determina-se o índice de sensibilidade a degradação (ISD) que é a relação da perda de massa do painel com a perda de massa média das amostras de madeira de *Fagus sylvatica* (Eq. 2).

O índice ISD indica a susceptibilidade das amostras ao ataque de fungos basidiomicetos (CURLING; MURPHY, 1999), sendo que um valor ISD igual ou

superior a 100 indica não resistência; inferior a 100 indica resistência ao fungo. Os bioensaios foram realizados no Laboratório de Production et Valorisation des Bois Tropicaux, do Centre Internationale de la Recherche Agronomique pour le Developpement (CIRAD), Montpellier, França.

$$ISD = \frac{T}{S} * 100 \dots\dots\dots (2)$$

Onde: ISD: índice de sensibilidade à degradação (%); T: perda de massa da amostra (%); S: média da perda de massa das amostras de controle.

### **3.4.6 Caracterização anatômica através de microscopia eletrônica de varredura (MEV)**

Os painéis, após os ensaios mecânicos de resistência a tração perpendicular, tiveram a linha de ruptura e aspectos anatômicos analisados sob MEV. Na etapa de preparação das amostras, as mesmas foram colocadas sobre pinos de alumínio e fixadas com fita de carbono dupla face. Para cada tratamento foram realizadas duas preparações tornando-se as amostras condutoras por deposição de ouro/paládio através do método de metalização (*sputtering*) que utilizou o equipamento Polaron Range SC7620 Sputter Coater (Quorum Technologies Ltd, Ashford, Inglaterra).

Durante as análises foi utilizado o modo alto vácuo, tendo sido usada uma pressão parcial no interior da câmara de 1,33 mbar e uma tensão de aceleração de 2 kV para aquisição de imagem e de 30 kV para análise química. Efetuaram-se análises de composição química elementar por EDS (Energy Dispersive Spectroscopy), acoplada ao MEV, sendo o tempo de aquisição e a área onde os espectros foram adquiridos similares para todas as amostras.

A obtenção de imagens por microscopia eletrônica de varredura (MEV) dos painéis, para caracterização anatômica, foi realizada nas duas regiões que apresentam maior contraste entre a presença e distribuição dos componentes celulares, que são o centro e a face dos painéis. No centro, as imagens foram obtidas dos corpos de prova submetidos aos ensaios de resistência à tração perpendicular, também no intuito de verificações sobre a mecânica dessa fratura, sendo que na face superficial dos painéis as imagens foram obtidas diretamente na região submetida ao ciclo de prensagem, ou seja, sem lixamento.

As análises foram realizadas no Laboratório de Anatomia, Identificação e Densitometria de Raios X em Madeiras do LCF/ESALQ/USP e na Unidade de Microscopia Eletrônica da UTAD, utilizando o equipamento FEI Quanta 400.

### **3.4.7 Caracterização por microtomografia de raios X**

Foram confeccionados 2 corpos de prova cilíndricos (20 x 15 mm, altura e espessura) de painéis (Figuras 20B, C) priorizando-se para as análises os painéis da Etapa A (maior variação da porcentagem de partículas de cana-de-açúcar, de 0-100%), bem como foram confeccionados 2 corpos de prova de painéis MDF e MDP comerciais de eucalipto, para comparativos com os painéis da presente pesquisa.

A estrutura interna dos painéis confeccionados com diferentes percentuais de fibras de eucalipto e partículas de bagaço de cana-de-açúcar foi analisada através de imagens coletadas em microtomógrafo de raios X marca Skyscan (Kontich, Bélgica), modelo 1172 (Figura 20A) cujas características são: tubo de raios X com tensão de 100 kV; corrente de 100  $\mu$ A; câmera digital R-X 12-bit; 3 posições automáticas de filtro para seleção de energia; tamanho do pixel detector  $< 0.8 \mu$ m; detalhes de detecção  $< 1 \mu$ m; resolução espacial de 5  $\mu$ m; comprimento e diâmetro máximo: 100 cm x 7 cm (SKYSCAN, 2010).

Os parâmetros de aquisição das imagens dos painéis foram: rotação da amostra em 180°; frame average 12; câmera 2k; sem filtro; resolução de 2,3  $\mu$ m; rotação de suporte em 0,3° e tempo por amostra de 2h. A reconstrução das imagens apresentou: smoothing 2; ring artifact correction 18; beam hardening correction em 60%; fonte de raios X com tensão de 60 kV e corrente de 180  $\mu$ A.

A imagem da estrutura anatômica das secções do painel é projetada na tela do monitor, utilizando o software *DataViewer*, pela movimentação do cursor as 2 linhas de orientação (verde e azul) (Figura 20D) que percorrem o eixo longitudinal da amostra, visualizando-se as imagens microscópicas sequenciais dos planos transversal e longitudinais radial e tangencial e possibilitando reconstruir a estrutura em 2D; com o mesmo software pode-se realizar nova sobreposição e reconstrução das imagens em 3D. As análises foram realizadas no Laboratório de Técnicas Nucleares, da Embrapa Instrumentação Agropecuária (CNPDIA) em São Carlos-SP.

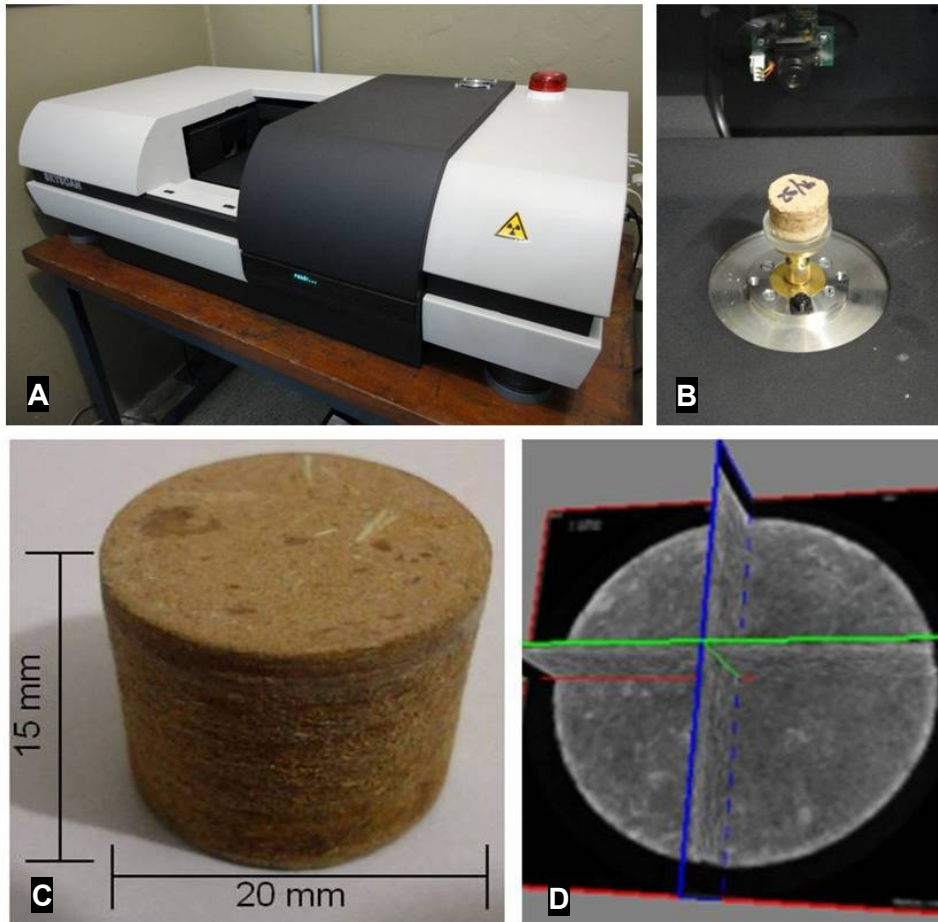


Figura 20 - (A) microtomógrafo Skyscan 1172; (B) amostra disposta no porta amostra; (C) aspecto e dimensões de amostra utilizada na obtenção de imagens da estrutura anatômica; (D) imagem da seção transversal da estrutura anatômica e indicação das linhas de referência (azul e verde) para a projeção dos planos longitudinais

A Figura 21 ilustra a etapa de materiais e de métodos, do processo de obtenção dos painéis pela mistura de fibras de eucalipto e de partículas de cana-de-açúcar e indica as análises das etapas de desenvolvimento do trabalho.

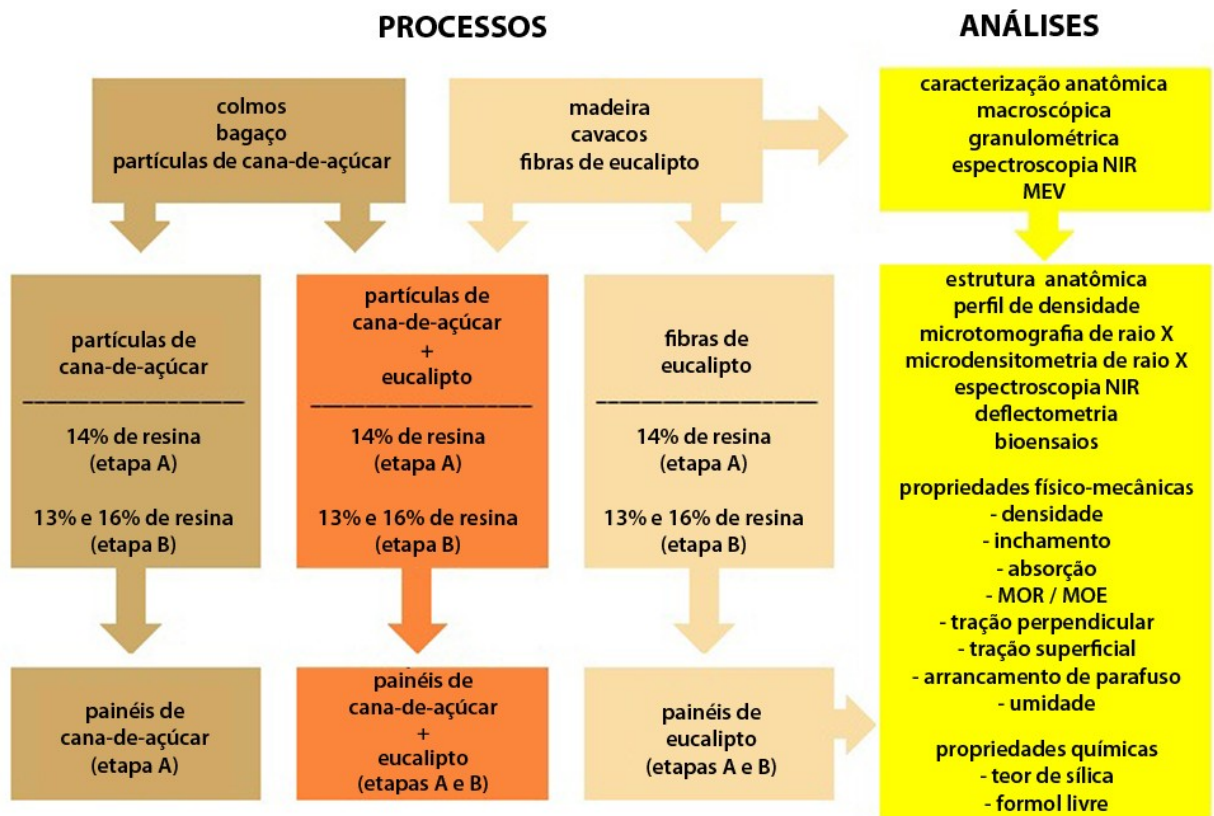


Figura 21 - Processo de obtenção dos painéis e análises propostas em cada etapa



## **4 RESULTADOS E DISCUSSÃO**

### **4.1 Caracterização das fibras de eucalipto, partículas do bagaço de cana-de-açúcar e da mistura de ambas**

#### **4.1.1 Caracterização macroscópica dos elementos fibrosos e misturas praticadas**

A caracterização macroscópica dos componentes fibrosos do colmo de cana-de-açúcar indica diferenças na morfologia nas frações de fibra-parênquima que passaram através da peneira de malha de 2,0 mm (Figura 22A-H). Estas diferenças estão relacionadas com a dimensão das partículas de cana-de-açúcar na mistura de diferentes proporções, que se apresentavam com longo comprimento, permitindo a passagem através da peneira seletora. Os componentes fibrosos na composição 100% (Figura 22H) são caracterizados por uma matriz de aglomerados de células de parênquima, partículas e feixes de fibras.

A caracterização macroscópica dos componentes fibrosos da madeira de *Eucalyptus grandis* indica que a morfologia esta relacionada com as variáveis do desfibramento dos cavacos de madeira. Os componentes fibrosos na composição 100% (Figura 22A) são caracterizados por uma matriz de fibras e demais células, comprovando a eficiência do desfibramento e a separação das fibras e outros componentes anatômicos da madeira. A aplicação de variáveis mais agressivas no processo de desfibramento promove o rompimento da parede das fibras e, em consequência, um aumento da fração fina, influenciando negativamente nas propriedades mecânicas dos painéis (BELINI, 2007).

Para uma possível manufatura de painéis de mistura de fibras de eucalipto e de partículas de cana-de-açúcar, em condições industriais, recomenda-se que o bagaço de cana-de-açúcar seja incorporado aos cavacos de madeira, através de esteira adjacente ao sistema de alimentação com o controle da quantidade (massa) adicionada. Através deste procedimento é possível obter homogeneidade na morfologia dos elementos celulares do bagaço de cana-de-açúcar em relação aos da madeira de eucalipto ou pinus para a confecção de painéis MDF, ou mesmo desfibrando separadamente.



Os componentes celulares da cana-de-açúcar destacam-se pela tonalidade mais clara em relação aos da madeira de eucalipto, com esta diferença de coloração e de textura perceptíveis na análise da superfície dos painéis. A aparência externa dos painéis constitui-se em parâmetro de qualidade e de aceitação pelo mercado.

No entanto, os painéis MDF e MDP recebem normalmente um tratamento de acabamento superficial, como pintura, aplicação de papéis de baixa pressão (BP), papéis finish foil (FF) ou lâminas de madeira antes da destinação para o consumidor final, pois no caso específico do MDF painéis de cor mais escura podem ser recusados por mercados mais sofisticados (IPT, 2009).

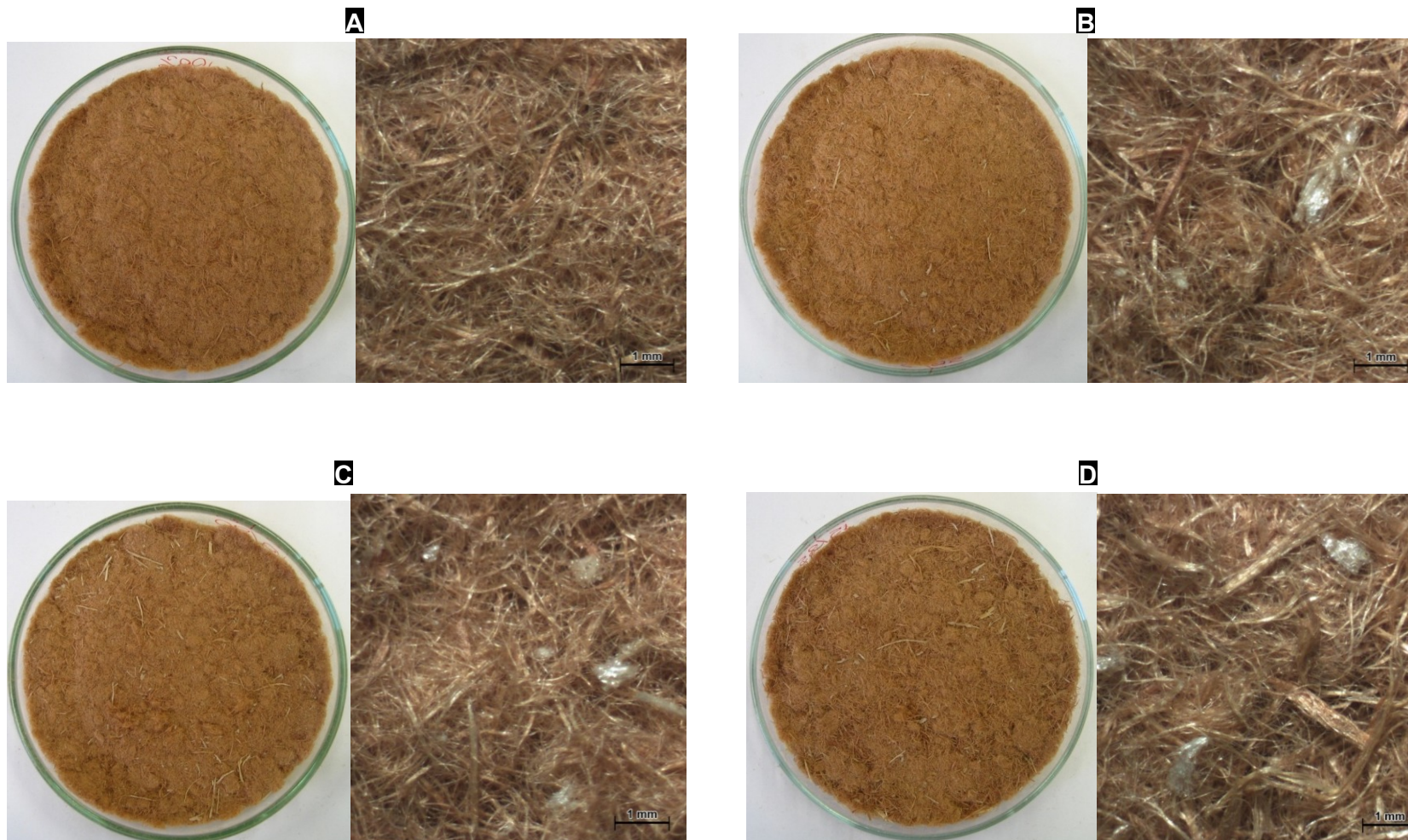


Figura 22 - Aspecto visual e ampliação dos componentes celulares de eucalipto e de cana-de-açúcar em suas diversas misturas. (A) 100% eucalipto; (B) 5% cana e 95% eucalipto; (C) 10% cana e 90% eucalipto; (D) 15% cana e 85 % eucalipto (continua)

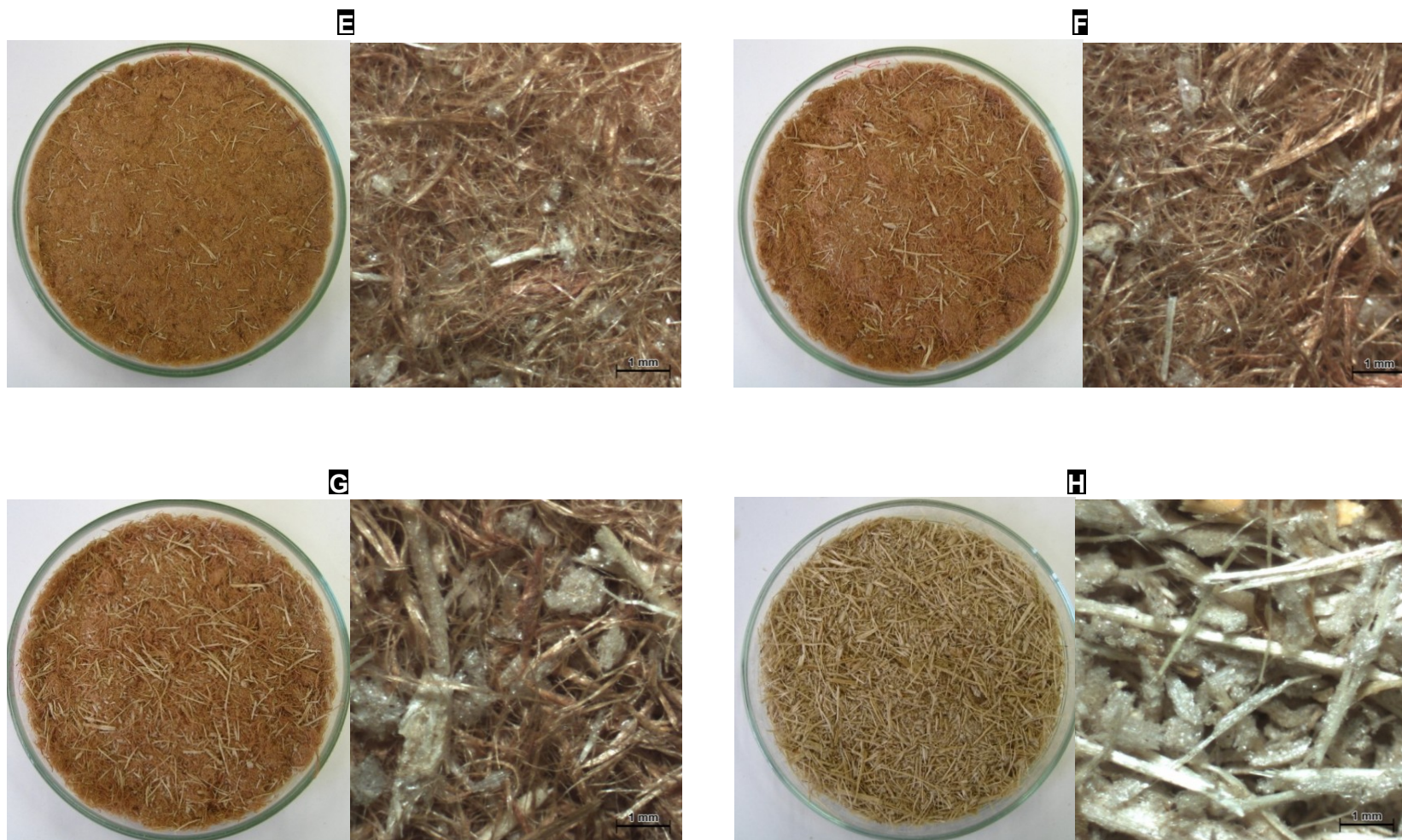


Figura 22 – Aspecto visual e ampliação dos componentes celulares de eucalipto e de cana-de-açúcar em suas diversas misturas (E) 20% cana e 80 % eucalipto; (F) 25% cana e 75 % eucalipto; (G) 50% cana e 50 % eucalipto; (H) 100% cana-de-açúcar (conclusão)

#### 4.1.2 Classificação granulométrica do bagaço de cana-de-açúcar

A classificação granulométrica das partículas do bagaço de cana-de-açúcar em peneiras do equipamento Prodest (Tabela 8) indica que 58,3% das partículas passaram através da peneira de abertura < 2,0 mm, ficando retidas no coletor. Esta fração das partículas do bagaço de cana-de-açúcar foi selecionada para a confecção dos painéis por apresentar uma morfologia considerada adequada para a confecção de painéis similares ao MDP ou para mistura com fibras de eucalipto.

O tratamento do bagaço de cana-de-açúcar em um desfibrador resultará em uma matéria prima uniforme, com maior homogeneidade granulométrica e possibilidade de aproveitamento total. No entanto, a utilização de peneiras vibratórias permite um aproveitamento elevado, superior a 58%, da massa total do bagaço de cana-de-açúcar.

Os valores de retenção das partículas do bagaço de cana-de-açúcar nas peneiras são influenciados pelas variáveis do processamento dos colmos da cana-de-açúcar, relacionadas com o tipo e modelo dos equipamentos de esmagamento. Valores apresentados por CTC (2011), utilizando equipamento Prodest, indicam percentagem de retenção de 13, 30, 5, 8 e 45% nas peneiras com abertura 12,7; 6,3; 3,0; 2,0 mm e coletor.

As partículas do bagaço de cana-de-açúcar retidas no coletor através de uma série de peneiras de menor dimensão de malha - 1,0 mm a < 0,259 e coletor – (Tabela 9) indicou uma maior homogeneidade de distribuição, com variações de 31,9 a 18,4% na peneira de 1,0 mm e coletor, respectivamente.

Os resultados apresentados por Peixoto e Brito (2000) da classificação morfológica de partículas de madeira de *Pinus taeda* obtidas em moinho de martelo indicam retenção de 49,9% das partículas na peneira de malha de 1,0 mm.

Utilizando-se as mesmas aberturas de peneira da Tabela 9, a classificação exploratória de fibras de eucalipto obtidas em linha de produção industrial, após desfibramento, indicaram que 46% do material é retido na malha com abertura de 1,0 mm, e que corresponde ao comprimento médio deste elemento celular indicado em literatura. Assim, no caso de confecção de painel tipo MDF, indica-se a necessidade de desfibramento para obtenção de morfologia similar de fibras entre as duas matérias primas visando atender as condições aplicadas no mercado consumidor brasileiro.

Tabela 8 – Classificação granulométrica das partículas de bagaço de cana-de-açúcar, em peneiras vibratórias de abertura 12,7-2,0 mm e valores médios de retenção (%)

<b>Abertura peneiras (mm)</b>	<b>Retenção média (%)</b>
12,7	<b>0,8</b> (1,2-0,5) (0,2) (23,6)
6,3	<b>7,6</b> (10,1-5,6) (1,5) (20,0)
3,15	<b>15,7</b> (18,7-13,5) (1,6) (10,3)
2,0	<b>17,6</b> (19,1-15,7) (1,2) (6,9)
<b>coletor</b>	<b>58,3</b> (61,1-55,8) (1,8) (3,1)

Valores médios seguidos de (máxima; mínima) (desvio padrão) e (coeficiente de variação).

Tabela 9 – Classificação granulométrica das partículas de bagaço de cana-de-açúcar, em peneiras vibratórias de aberturas 1,0-0,297 mm e valores médios de retenção (%)

<b>Abertura peneiras (mm)</b>	<b>Retenção média (%)</b>
1,0	<b>31,9</b> (43,7-23,3) (5,9) (18,5)
0,59	<b>29,3</b> (31,4-27,1) (1,3) (4,4)
0,297	<b>20,4</b> (24,9-15,5) (2,8) (13,6)
<b>coletor</b>	<b>18,4</b> (26,1-12,3) (4,1) (22,5)

Valores médios seguidos de (máxima; mínima) (desvio padrão) e (coeficiente de variação).

#### 4.1.3 Caracterização anatômica através de microscopia eletrônica de varredura (MEV)

##### Partículas de cana-de-açúcar

O exame das imagens possibilita a identificação dos componentes celulares do colmo de cana-de-açúcar (Figura 23). De modo geral, observa-se elevada

frequência de células de parênquima agrupadas, bem como de feixes de fibras e da epiderme do caule, representativos da estrutura original dos colmos de cana-de-açúcar, representada pelos feixes fibro-vasculares e epiderme.

A nova classificação dos componentes fibrosos de cana-de-açúcar, em peneiras vibratórias do equipamento Produtest utilizando as malhas Granutest sequenciais de abertura 1,0; 0,59; 0,259 e < 0,259 mm (coletor) propiciou a caracterização pormenorizada dos elementos celulares do bagaço de cana-de-açúcar, quanto aos aspectos morfológicos. As frações dos componentes fibrosos retidas em todas as peneiras foram indicativas da presença de (i) feixes de fibras, (ii) células de parênquima aglomeradas e (iii) fragmentos de epiderme, evidenciando o corte longitudinal e o esmagamento dos tecidos/células no processo industrial de extração da sacarose. A presença de fragmentos de fibras e de resíduos fibrosos na forma de pó foram observadas, da mesma forma, por Halvarsson et al. (2008) no processo desfibramento de talos de trigo, durante obtenção de fibras para confecção de painéis MDF, e caracterizados através de imagens MEV.

### **Fibras de eucalipto**

São observadas algumas fibras dispostas em feixes indicando a disposição original nos cavacos de madeira mesmo após o desfibramento e que se pode considerar de normal ocorrência após o processo de desfibramento (Figura 24). Da mesma forma, foram observadas células de vasos e de parênquima longitudinal e radial, entremeadas às fibras, caracterizadas pela fina parede celular em comparação com as fibras e, portanto, passíveis de degradação no desfibramento termo-mecânico. Células de vaso e de parênquima são de difícil observação, mesmo sob microscopia eletrônica de varredura, quando os cavacos de madeira são submetidos a condições agressivas de desfibramento termo-mecânico.

Polpas de madeira com elevada incidência de ruptura da parede das fibras e demais elementos celulares são oriundas de agressivas condições de desfibramento e resultam em aumento da área superficial específica das fibras para o efetivo recobrimento com a resina amínica (BELINI, 2007).

A análise dos componentes celulares da madeira de eucalipto após desfibramento não indicou danos ou ruptura das paredes celulares no sentido transversal, como o que foi observado para painéis MDF de madeira de *Pinus*

*radiata*, com fraturas nas camadas S1-S2 da parede secundária das traqueídes (CHAPMAN; JORDAN, 2002).

### Mistura de partículas de cana-de-açúcar e fibras de eucalipto

Os elementos celulares característicos do colmo da cana-de-açúcar e da madeira de eucalipto podem ser distinguidos nas imagens MEV. As células da madeira de eucalipto e do colmo da cana-de-açúcar, descritas nos itens anteriores podem, da mesma forma, ser identificadas pela morfologia e dimensões, mantidas inalteradas. Os componentes celulares do colmo da cana-de-açúcar são de maiores dimensões, observando-se, com frequência, as células de parênquima agrupadas, íntegras ou em fragmentos e, também, de células fragmentadas da epiderme (Figuras 25).

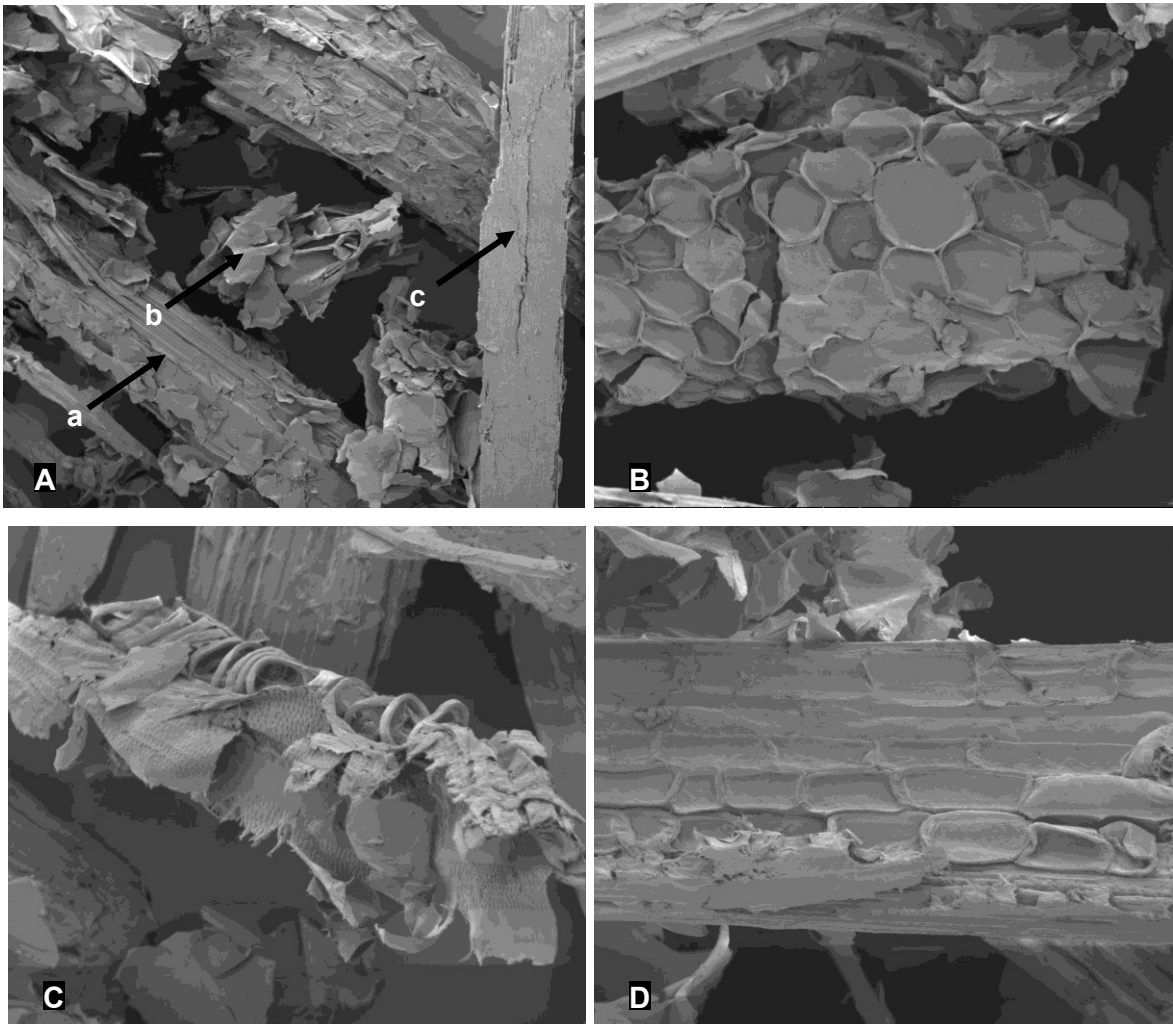


Figura 23 – Componentes celulares do colmo de cana-de-açúcar. (A) feixe de fibras (a), parênquima (b) e epiderme (c) (150 x); (B) detalhe de parênquima (300 x); (C) elemento de vaso rompido (600 x) e (D) células de parênquima (600 x)

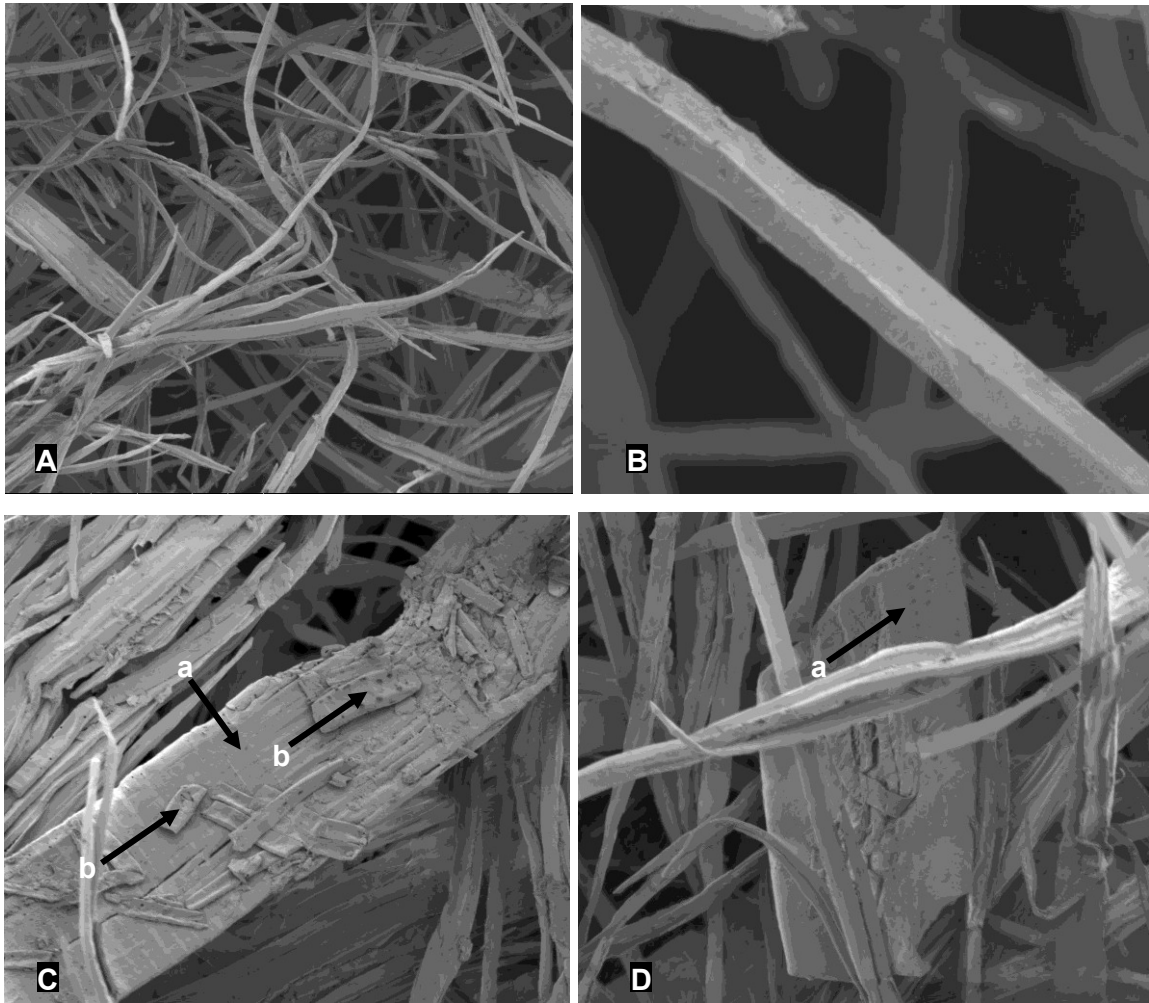


Figura 24 – Componentes celulares do eucalipto. (A) aspecto das fibras após desfibramento (250 x); (B) fibra separada na lamela média (2000 x); (C) feixe de fibras (a) com células de parênquima radial (b) (500 x) e (D) elemento de vaso (a) (600 x)



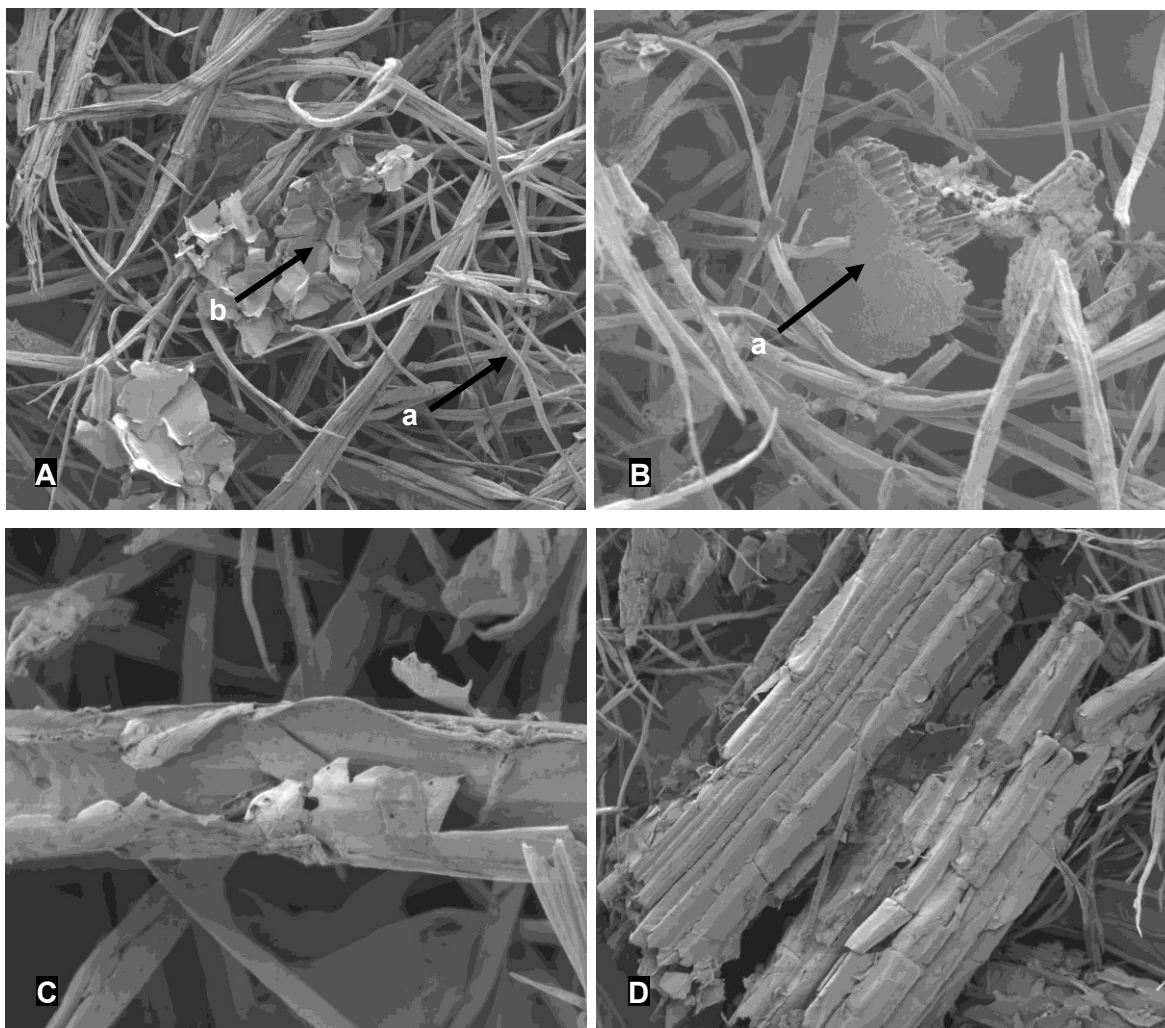


Figura 25 – Mistura de elementos de cana-de-açúcar e eucalipto: (A) fibras de eucalipto (a) e parênquima de cana-de-açúcar (b) (200 x); (B) região da epiderme da cana-de-açúcar (a) entre fibras de eucalipto (400 x); (C) elemento de vaso da cana-de-açúcar rompido (800 x) e (D) aglomerado de células de parênquima da cana-de-açúcar (150 x)

#### 4.1.4 Caracterização por espectroscopia no infravermelho próximo (NIR)

O resultado da análise das fibras de eucalipto, das partículas do bagaço de cana-de-açúcar e sua mistura em diferentes porcentagens através do NIR (Figura 26) possibilita a (i) diferenciar as curvas de misturas de diferentes percentuais de frações e (ii) a detecção do efeito da sua mistura através de diferentes granulometrias.

As amostras de partículas de bagaço de cana-de-açúcar, que passaram na peneira com abertura < 2,0 mm (conforme item 4.1.2) apresentam os níveis mais elevados de absorvância (linha vermelha), em relação às amostras de fibras da madeira de eucalipto após desfibramento, com os níveis mais baixos, (linha azul),

para toda a faixa de comprimento de onda, que foi de 4000 a 12000  $\text{cm}^{-1}$ . Devem-se ser destacadas as regiões do espectro que caracterizam a composição química, como os de comprimento de onda entre 4060 a 4282, 4505 a 4545, 5051 a 5150 e 7057 a 7092  $\text{cm}^{-1}$ , indicativas da celulose, lignina, umidade e lignina, respectivamente.

Para as amostras lenhosas das 2 espécies os maiores valores de absorvância foram observados nas faixas de comprimento de onda entre 4000 e 9000  $\text{cm}^{-1}$ , com indicativo de diminuição da diferença de absorção entre as duas espécies para comprimento de onda acima de 9000  $\text{cm}^{-1}$ .

A mistura das fibras de eucalipto e das partículas do bagaço de cana-de-açúcar evidencia diferenças nos valores do espectro de absorvância indicando que o acréscimo de partículas de cana-de-açúcar promove maior absorção, conforme evidenciado na Figura 26.

As diferenças dos espectros de absorvância das partículas do bagaço de cana-de-açúcar, das fibras de eucalipto e de sua mistura indicam a possibilidade da aplicação da espectroscopia no infravermelho próximo (NIR) no controle de qualidade da matéria prima para a confecção de painéis, em escala laboratorial e em linha de produção industrial.

A análise das 4 frações das partículas do bagaço de cana-de-açúcar, classificadas pelas peneiras de menor abertura (item 4.1.2) indica, da mesma forma, diferenças nos espectros de absorvância para comprimentos de onda entre 4000 a 12000  $\text{cm}^{-1}$  (Figura 27). O material retido na peneira com abertura 1,0 mm (linha azul) apresenta absorvância similar ao verificado na Figura 26 para a amostra com 100% bagaço de cana-de-açúcar (linha vermelha) e o material fracionado em peneiras de menores aberturas indicou redução da absorvância e a efetividade das análises através do NIR para discriminar as frações granulométricas do material fibroso.

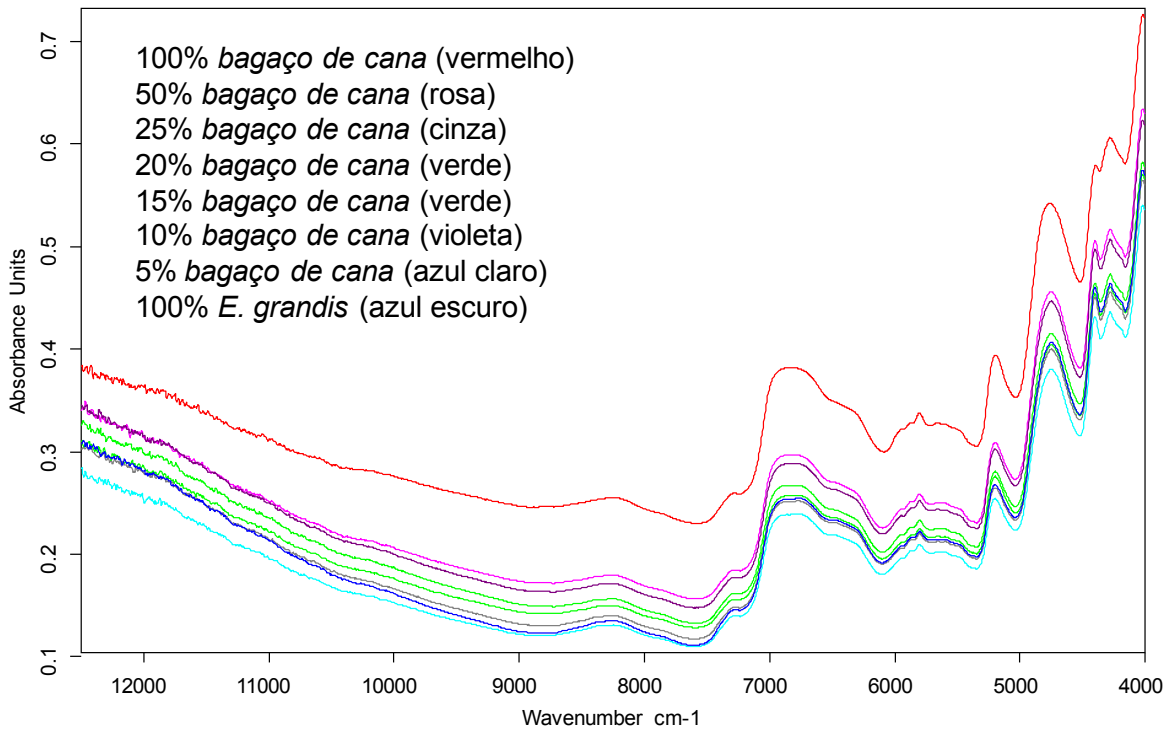


Figura 26 – Espectros de absorvância, obtidos com comprimento de onda entre 12000 a 4000  $\text{cm}^{-1}$ , de diferentes percentuais de mistura entre fibras de eucalipto e partículas do bagaço de cana-de-açúcar

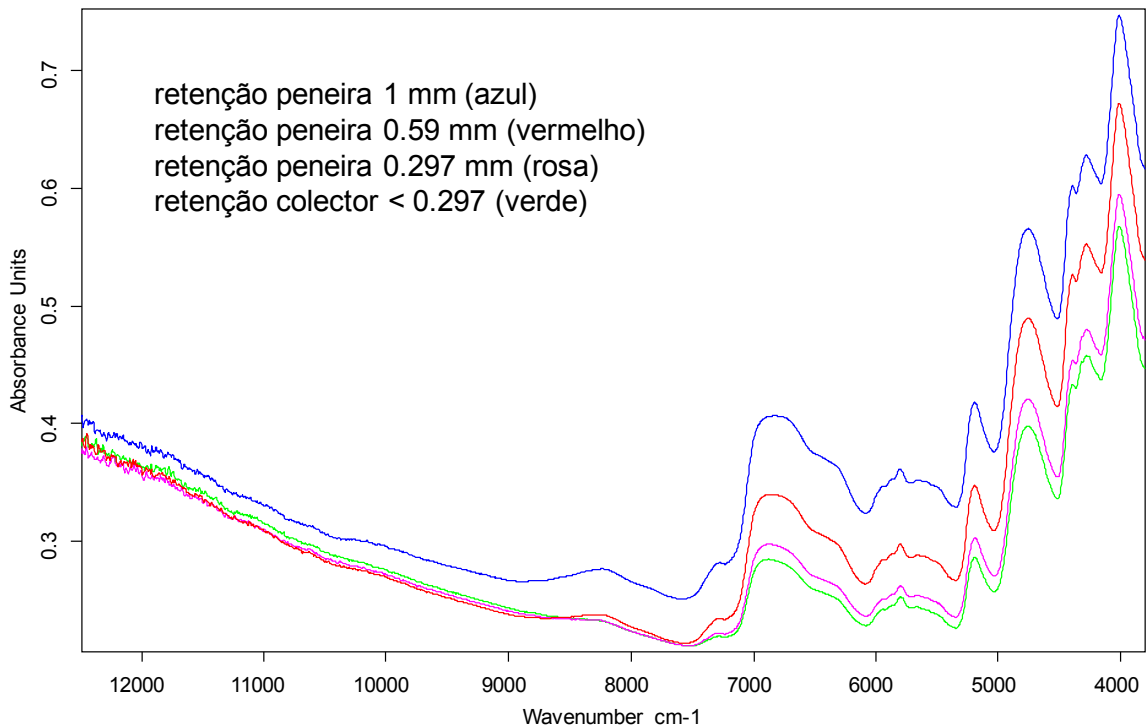


Figura 27 – Espectros de absorvância, obtidos com comprimento de onda entre 12000 a 4000  $\text{cm}^{-1}$ , de partículas do bagaço de cana-de-açúcar após classificação morfológica em diferentes peneiras

## 4.2 Caracterização dos painéis de fibras de eucalipto e partículas do bagaço de cana-de-açúcar

### 4.2.1 Caracterização dos perfis de densidade por atenuação de raios X

#### 4.2.1.1 Densitômetro GreCon DA-X

**Etapa A:** os perfis de densidade aparente ao longo da espessura dos painéis com 0-25-50-75-100% de partículas de cana-de-açúcar, confeccionados com 14% de resina (Figura 28) são caracterizados pela maior densidade ( $961 \text{ kg m}^{-3}$ ) na sua face, com gradativa redução e menor densidade ( $646 \text{ kg m}^{-3}$ ) em seu centro, com tendência de estabilização no interior do painel. O perfil de densidade aparente do painel é similar à letra M, sendo reportado para painéis MDF manufacturados com elementos fibrosos de diferentes espécies (WONG et al., 2000; CAI et al., 2006; AYRILMIS, 2007). Por outro lado, os perfis de densidade são aplicados na detecção de decréscimo da densidade na região central, relacionadas com a matéria prima e com o processo de confecção dos painéis, como as verificadas nos painéis com 75% (Figura 28D) e 100% (Figura 28E) de partículas de cana-de-açúcar, indicativas da cura incompleta da resina e da granulometria e estrutura anatômica das partículas na região interna do painel

Ainda, a norma EN 622-1 (2003) prevê uma tolerância de  $\pm 7\%$  nos valores de densidade aparente ao longo da espessura do painel, não atendida para os painéis confeccionados com 100% de partículas de cana-de-açúcar. Esse resultado demonstra a necessidade da adequação dos parâmetros da matéria prima e do ciclo de prensagem (ex.: umidade das fibras, tempo de prensagem, temperatura do prato da prensa, curva de aplicação de pressão), conforme estudo realizado por Wong et al. (2000).

Os perfis de densidade dos painéis indicam ser viável a utilização de até 50% de partículas de cana-de-açúcar (Figura 28C) em mistura com fibras de eucalipto, sem a necessidade de alterações sensíveis nas variáveis do ciclo de prensagem.

O perfil de densidade aparente de painel com propriedades tecnológicas ideais é caracterizado por uma camada externa (capa) de alta densidade ( $\sim 1000 \text{ kg m}^{-3}$ ), conferindo ao painel uma superfície não porosa, adequada à pintura e laminação e menor densidade e homogeneidade no interior ( $\sim 650 \text{ kg m}^{-3}$ ),

favorecendo a sua fresagem e usinagem e contribuindo para maior resistência mecânica (MOARCAS; IRLE, 1997).

Os valores de densidade aparente média, mínima e máxima dos painéis variam de 687-733, 580-696 e 912-993 kg m<sup>-3</sup>, respectivamente, com tendência de redução da densidade com o aumento do percentual de partículas de bagaço de cana-de-açúcar sem, no entanto, haver diferença estatisticamente significativa (Tabela 10).

As imagens de raios X digital, obtidas em equipamento Faxitron, indicam o gradiente de densidade entre as regiões central (baixa atenuação de raios X) e superficial (alta atenuação de raios X) dos painéis, corroborando com as imagens e dados quantitativos dos perfis. Observa-se que o aumento do percentual de partículas de cana-de-açúcar promove o acréscimo de cristais nos painéis, ilustrados na Figura 29, que apresentam alta atenuação de raios X e possivelmente são oriundos de aglomerados de parênquima de cana-de-açúcar recobertos por adesivo, e que corroboram com as imagens de microCT (item 4.2.7).

**Etapa B:** os perfis de densidade aparente ao longo da espessura dos painéis com 0-5-10-15-20-25% de partículas de cana-de-açúcar, **com 13% de resina** (Figura 30) são, da mesma forma, caracterizados pela maior densidade (958 kg m<sup>-3</sup>) na sua face, com gradativa redução e menor densidade (670 kg m<sup>-3</sup>) em seu centro, com tendência de estabilização no interior do painel. Conforme analisado para os painéis da Etapa A, o perfil de densidade aparente dos diferentes painéis é similar à letra M.

Para os painéis com 100% de fibras de eucalipto (Figura 30A) verificam-se diferenças nos valores de densidade máxima e mínima, de 1036-839 kg m<sup>-3</sup> e de 748-582 kg m<sup>-3</sup>, respectivamente, possivelmente devido aos valores da umidade do colchão de fibras na fase anterior ao processo de prensagem. No entanto, esses painéis apresentam a homogeneidade de densidade na sua camada interna, atendendo os parâmetros de qualidade e de aplicação.

Para os painéis dos demais tratamentos (Figuras 30B-F) há similaridade no formato dos perfis internos a cada tratamento.

Possivelmente, a variação da densidade aparente na região interna dos painéis deve-se à granulometria dos fragmentos do bagaço de cana-de-açúcar, de morfologia mais grosseira, em relação às fibras de eucalipto, bem como pelo percentual de resina aplicado.

Os perfis de densidade aparente ao longo da espessura dos painéis com 0-5-10-15-20-25% de partículas de cana-de-açúcar, **com 16% de resina** (Figura 31) replicam o modelo de variação (letra M) observado nos ensaios anteriores. As variações internas de densidade dos painéis com 100% de fibras de eucalipto foram reduzidas em relação à umidade final do colchão (Figura 30A).

Para os painéis dos demais tratamentos (Figuras 31B-F) há similaridade no formato dos perfis internos a cada tratamento e comparativamente aos perfis da etapa B/13% de resina.

Os valores de densidade dos painéis, com ênfase aos da camada superficial ( $> 1000 \text{ kg m}^{-3}$ ), relacionam-se com os resultados dos ensaios físico-mecânicos, quanto ao módulo de ruptura (Tabela 15, item 4.2.3.2) e, da mesma forma, constatado por Wong et al. (2000).

Os perfis de densidade aparente e os resultados dos testes físico-mecânicos (Tabela 16, item 4.2.3.3.) recomendam a utilização de 16% de resina na confecção de painéis com partículas de cana-de-açúcar, pela sua composição anatômica e granulometria, com elevada porcentagem de células de parênquima, de menor dimensão e maior área superficial (Figuras 23-25) para o recobrimento com a resina uréia formol, em relação às fibras.

Os valores de densidade média aparente (máxima, média e mínima) dos painéis com 13% de resina (Tabela 10) indicam maior heterogeneidade dos valores de densidade mínima, através das diferenças significativas entre as médias. Para os painéis com 16% de resina (Tabela 10), todos os valores de densidade mínima apresentam similaridade estatística e indicam que esta maior dosagem de resina proporcionou maior homogeneidade na região central do painel, refletindo em melhores propriedades físico-mecânicas, corroborando com o item 4.2.3.3.

Em relação à literatura, valores similares de densidade média foram relatados em painéis MDF de mistura de fibras de eucalipto e de traqueídes de pinus (BENADUCE, 1998), painéis MDF de traqueídes de pinus (ELEOTÉRIO, 2000) e painéis MDF de fibras de *E. grandis*, com densidade máxima, média e mínima de 1008-697-609  $\text{kg m}^{-3}$  (BELINI et al., 2009).

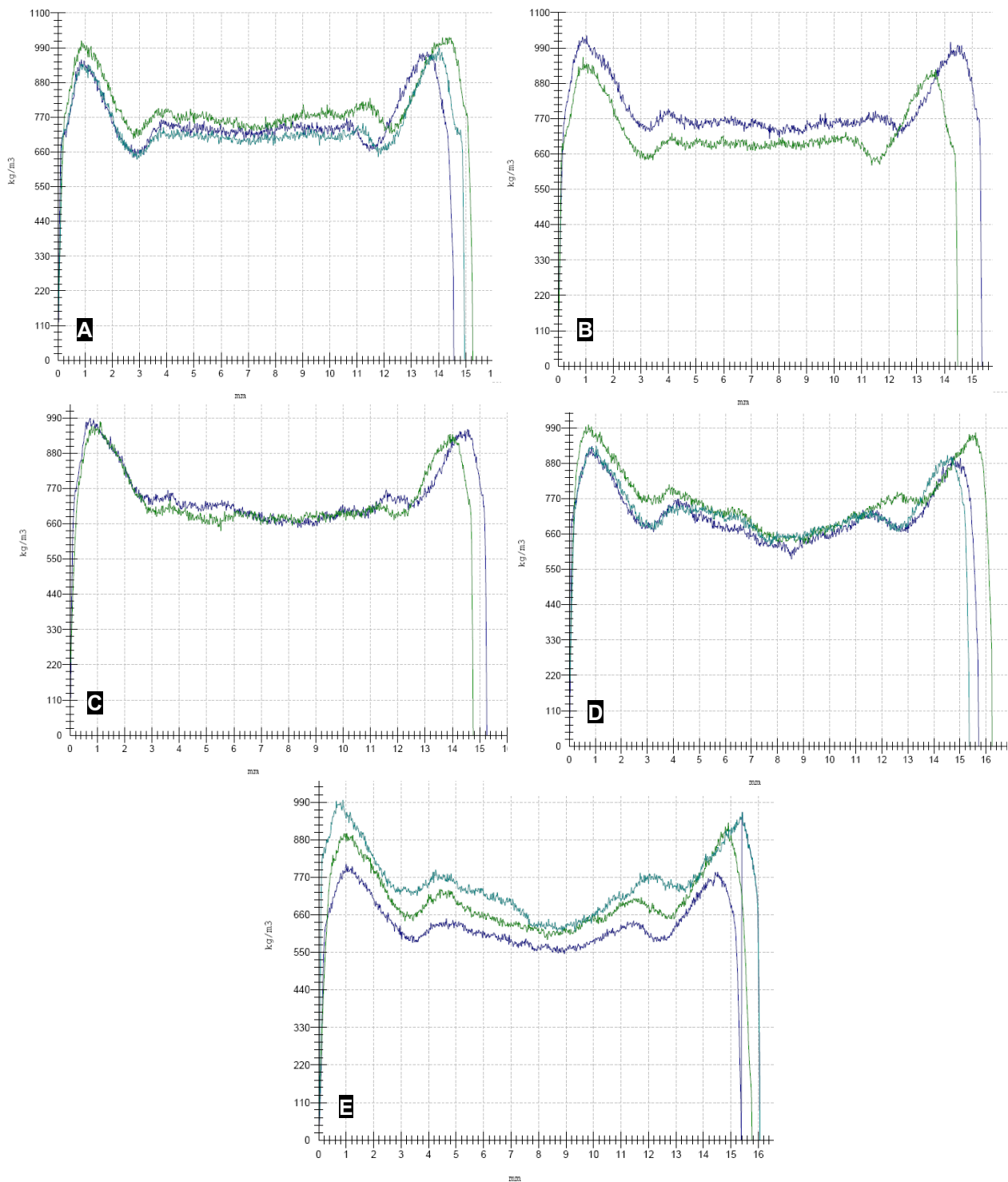


Figura 28 - Perfis de densidade ao longo da espessura dos painéis, etapa A, com 14% resina. (A) 100% eucalipto, (B) 25% cana-de-açúcar e 75% eucalipto, (C) 50% cana-de-açúcar e 50% eucalipto; (D) 75% cana-de-açúcar e 25% eucalipto; (E) 100% cana-de-açúcar

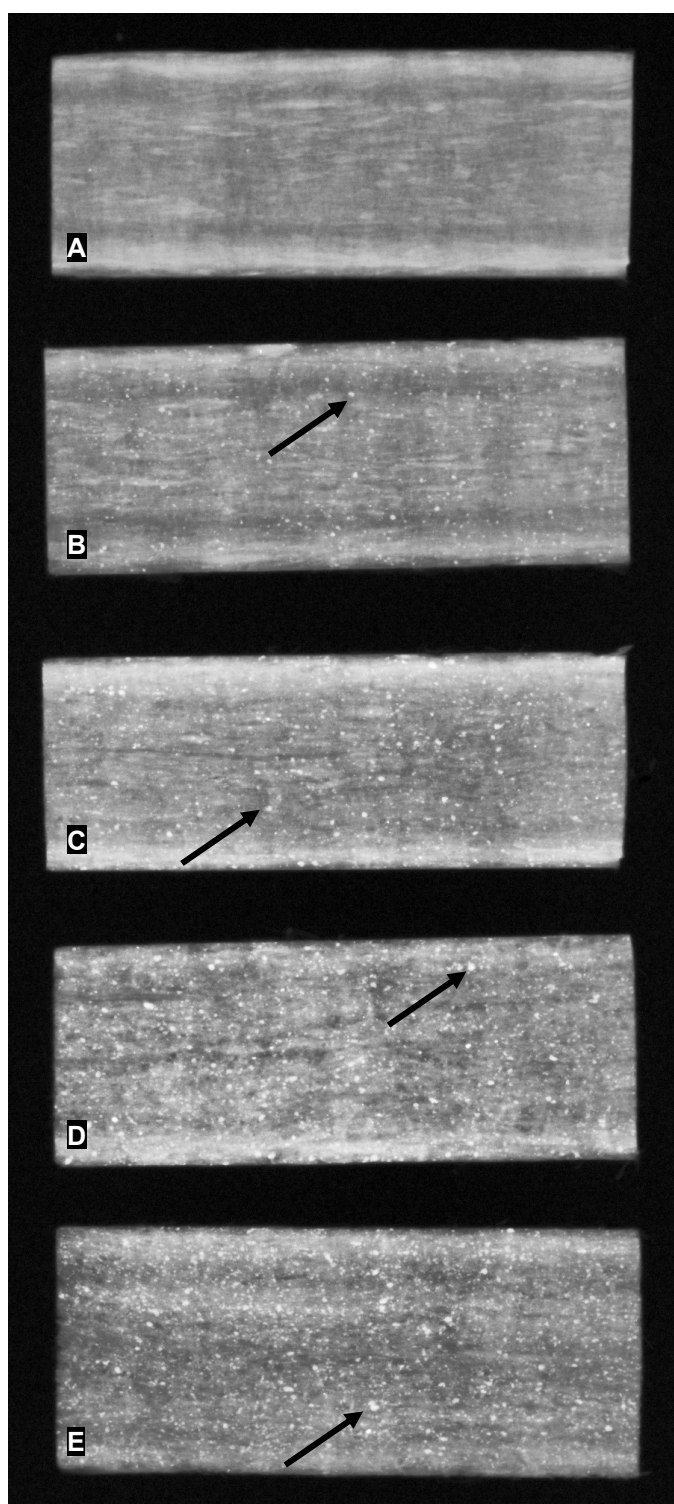


Figura 29 – Imagens de raios X digital dos painéis, etapa A, com 14% resina. (A) 100% eucalipto, (B) 25% cana-de-açúcar e 75% eucalipto, (C) 50% cana-de-açúcar e 50% eucalipto; (D) 75% cana-de-açúcar e 25% eucalipto; (E) 100% cana-de-açúcar. Setas indicam cristais, possivelmente formados por agrupamento de parênquima recoberto por adesivo



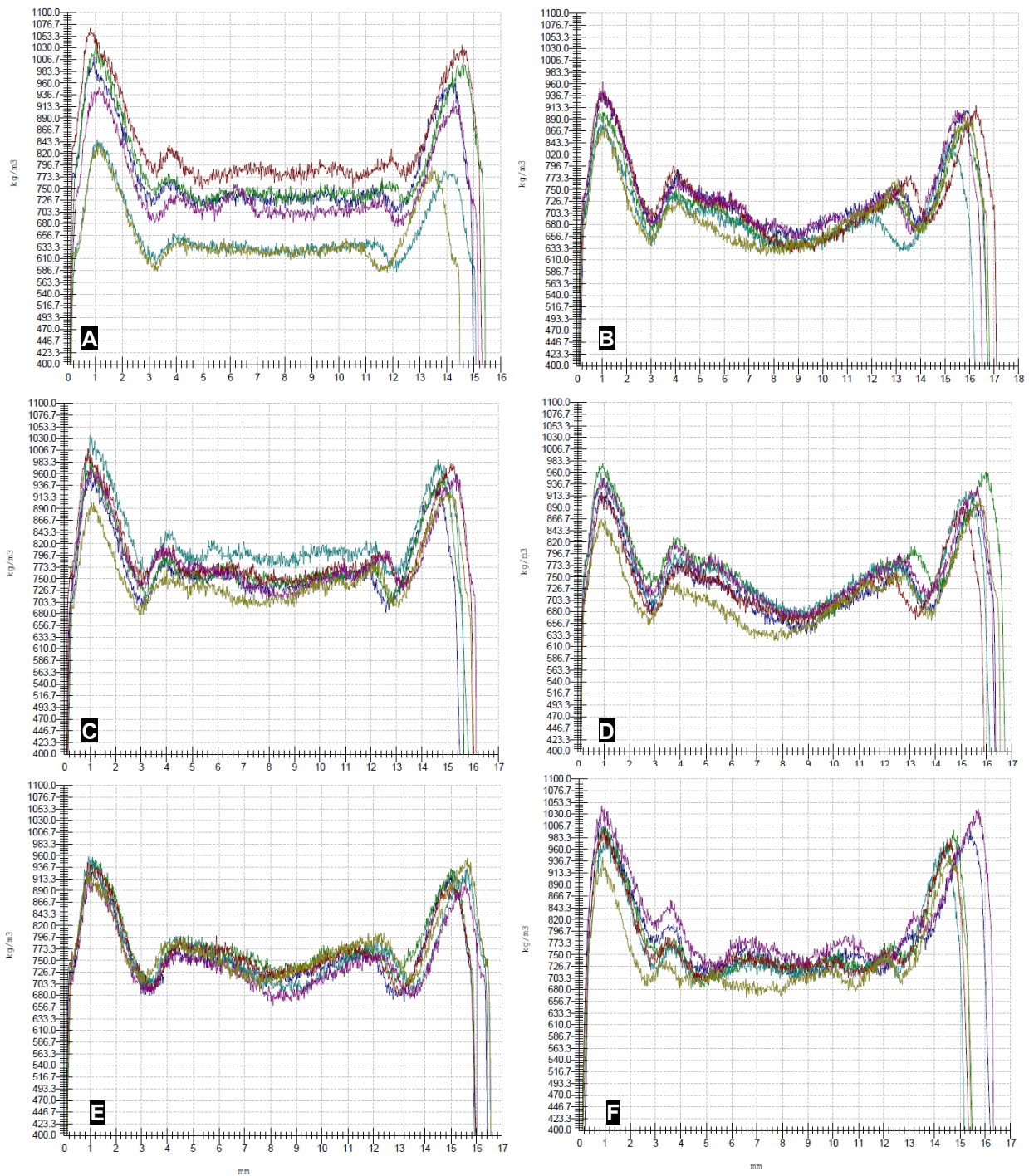


Figura 30 - Perfis de densidade, etapa B, com 13% resina. (A) 100% eucalipto, (B) 5% cana-de-açúcar e 95% eucalipto, (C) 10% cana-de-açúcar e 90% eucalipto; (D) 15% cana-de-açúcar e 85% eucalipto; (E) 20% cana-de-açúcar e 80% eucalipto, (F) 25% cana-de-açúcar e 75% eucalipto

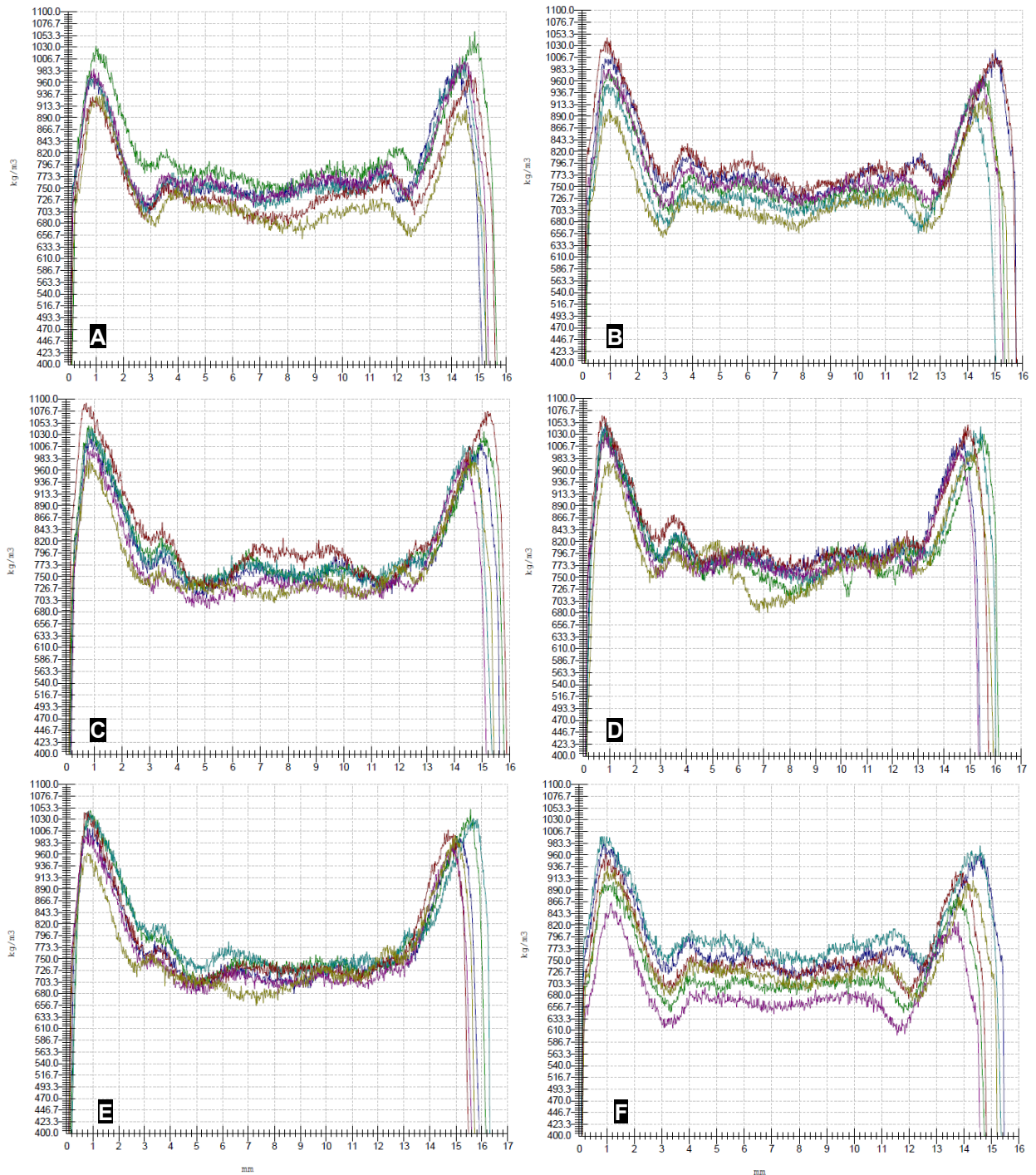


Figura 31 - Perfis de densidade, etapa B, com 16% resina. (A) 100% eucalypto, (B) 5% cana-de-açúcar e 95% eucalypto, (C) 10% cana-de-açúcar e 90% eucalypto, (D) 15% cana-de-açúcar e 85% eucalypto; (E) 20% cana-de-açúcar e 80% eucalypto, (F) 25% cana-de-açúcar e 75% eucalypto

Tabela 10 – Densidades máximas, médias e mínimas dos perfis obtidos no densitômetro GreCon, por etapa e tratamento

Etapa	Tratamento	Densidades médias (kg m <sup>-3</sup> )		
		máxima	média	mínima
<b>A</b>	100% eucalipto	969 a	720 a	664 a
	25% cana / 75% eucalipto	993 a	733 a	696 a
	50% cana / 50% eucalipto	985 a	716 a	651 a
	75% cana / 25% eucalipto	945 a	704 a	640 a
	100% cana	912 a	687 a	580 a
<b>B (13% UF)</b>	100% eucalipto	959 a	739 ab	667 abc
	5% cana / 95% eucalipto	925 a	717 a	631 a
	10% cana / 90% eucalipto	981 a	778 b	707 c
	15% cana / 85% eucalipto	938 a	743 ab	648 ab
	20% cana / 80% eucalipto	944 a	761 ab	678 abc
	25% cana / 75% eucalipto	1000 a	766 ab	690 bc
<b>B (16% UF)</b>	100% eucalipto	998 ab	773 ab	687 a
	5% cana / 95% eucalipto	985 ab	770 ab	690 a
	10% cana / 90% eucalipto	1032 b	792 ab	709 a
	15% cana / 85% eucalipto	1040 b	811 b	727 a
	20% cana / 80% eucalipto	1027 b	771 ab	684 a
	25% cana / 75% eucalipto	941 a	748 a	671 a

Valores médios de densidade. Letras diferentes em uma mesma coluna, para cada tratamento, diferem entre si ao nível de 5% de probabilidade (teste Tukey).

#### 4.2.1.2 Densitômetro Joyce LoebI

**Etapa B:** os perfis de densidade aparente ao longo da espessura dos painéis com 0-5-10-15-20-25% de partículas de cana-de-açúcar, **com 13% de resina** (Figura 32) são, da mesma forma, caracterizados pela maior densidade (786 kg m<sup>-3</sup>) na sua face, com gradativa redução e menor densidade (450 kg m<sup>-3</sup>) em seu centro, com tendência de estabilização no interior do painel, porém sem similaridade à letra M.

Os perfis de densidade aparente ao longo da espessura dos painéis com 0-5-10-15-20-25% de partículas de cana-de-açúcar, **com 16% de resina** (Figura 33) são, da mesma forma, caracterizados pela maior densidade (786 kg m<sup>-3</sup>) na sua face, com gradativa redução e menor densidade (445 kg m<sup>-3</sup>) em seu centro, com tendência de estabilização no interior do painel, porém, conforme já comentado para os painéis obtidos com 13% de resina, sem similaridade à letra M.

As diferenças observadas nos perfis de densidade aparente dos painéis de fibras de eucalipto e de partículas de cana-de-açúcar, com 13 e 16% de resina, obtidos por densitometria de raios X através dos equipamentos GreCon (Figuras 29 e 30) e Joyce Loeb (Figuras 31 e 32) devem-se: (i) à espessura das amostras analisadas (50 e 2-3 mm, para GreCon e Joyce Loeb, respectivamente), (ii) características da análise (diretamente na amostra e varredura através de filme radiográfico, para GreCon e Joyce Loeb, respectivamente) e da (iii) fonte de raios X (intensidade, miliamperagem, kilovoltagem, colimação dos feixes e tempo de exposição), conforme item 3.4.1.

O equipamento GreCon, bem como outros disponíveis no mercado, reproduz a variação média de atenuação dos raios X em um corpo de prova de painel de 50 mm de espessura. Por outro lado, o equipamento Joyce Loeb, bem como outros disponíveis no mercado, reproduz em valores de densidade as variações da granulometria e morfologia das partículas dos corpos de prova dos painéis de 2-3 mm de espessura.

Os perfis de densidade obtidos com corpos de prova delgados (2-3 mm) podem ser analisados, comparativamente, com as imagens digitais de raios X, ampliando as possibilidades de diagnóstico dos parâmetros da matéria prima e dos processos de confecção dos painéis (CHEN et al., 2009; ZEGARRA, 2011). Desta forma, as 2 metodologias e os 2 equipamentos aplicados na obtenção dos perfis de densidade de painéis têm diferentes objetivos e aplicações no processo de caracterização tecnológica dos painéis.

O valor da densidade aparente média (máxima, média e mínima) dos painéis de fibras de eucalipto e de mistura com partículas de cana-de-açúcar com 13 e 16 % de resina (Tabela 11), indica que há flutuação de valores expressa através de diferenças significativas entre os tratamentos.

A comparação do valor de densidade aparente dos painéis obtido pelos 2 métodos, GreCon x amostras de 50 mm e Joyce Loeb x amostras de 2-3 mm (Tabelas 10 e 11) indica que os valores obtidos no método tradicional (via GreCon) apresentam valores sistematicamente superiores aos dados obtidos através do densitômetro Joyce Loeb. Assim, efetivamente, os perfis de densidade obtidos através do densitômetro Joyce Loeb modelo 3CS, como técnica padrão e efetiva para caracterização do perfil radial medula – casca em amostras de madeira, não

apresentaram resultados satisfatórios para painéis de madeira compostos por fibras de eucalipto e partículas do bagaço de cana-de-açúcar.

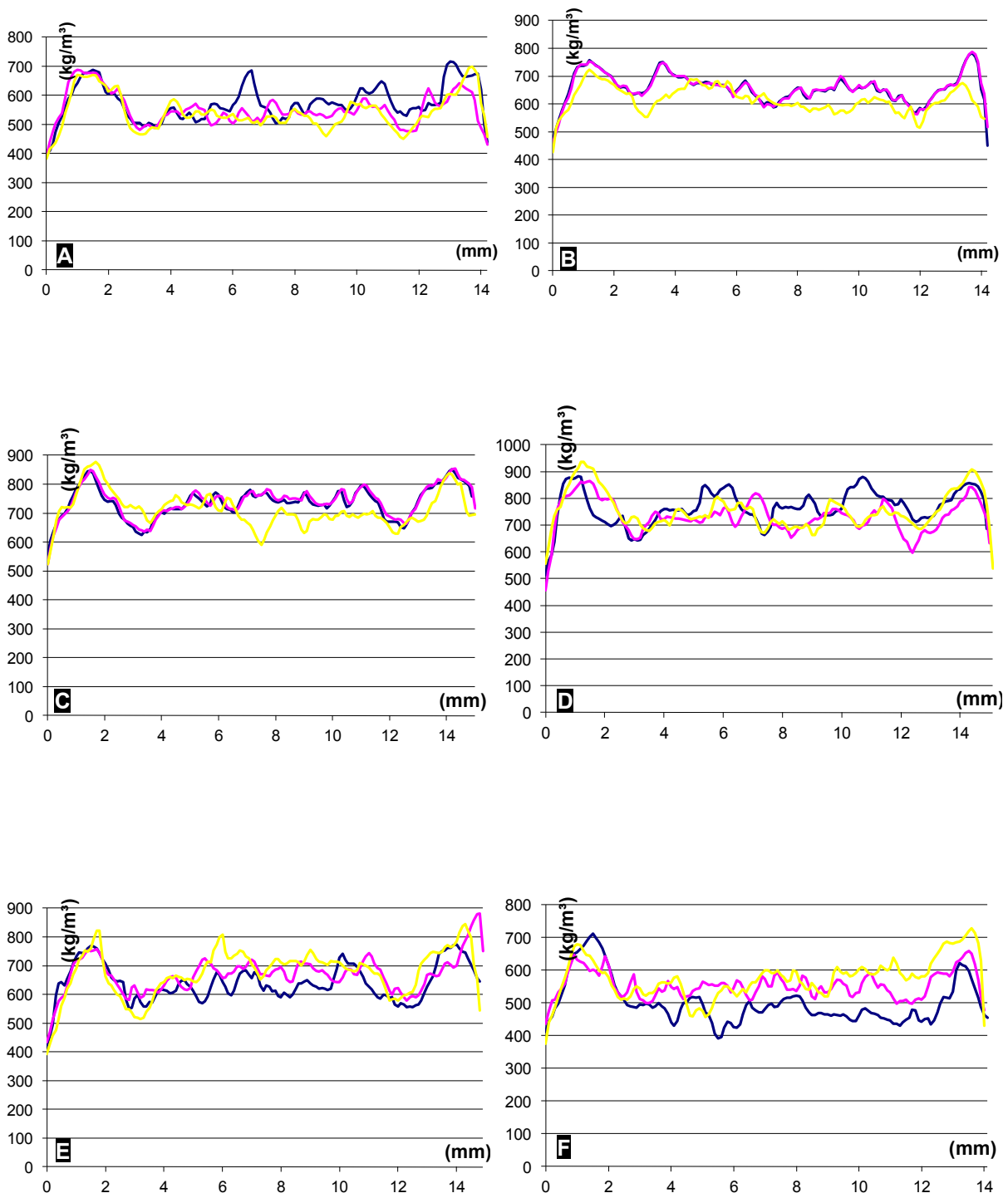


Figura 32 – Perfis, densitômetro Joyce Loebli, com 13% resina. (A) 100% eucalipto, (B) 5% cana-de-açúcar e 95% eucalipto, (C) 10% cana-de-açúcar e 90% eucalipto, (D) 15% cana-de-açúcar e 85% eucalipto, (E) 20% cana-de-açúcar e 80% eucalipto, (F) 25% cana-de-açúcar e 75% eucalipto

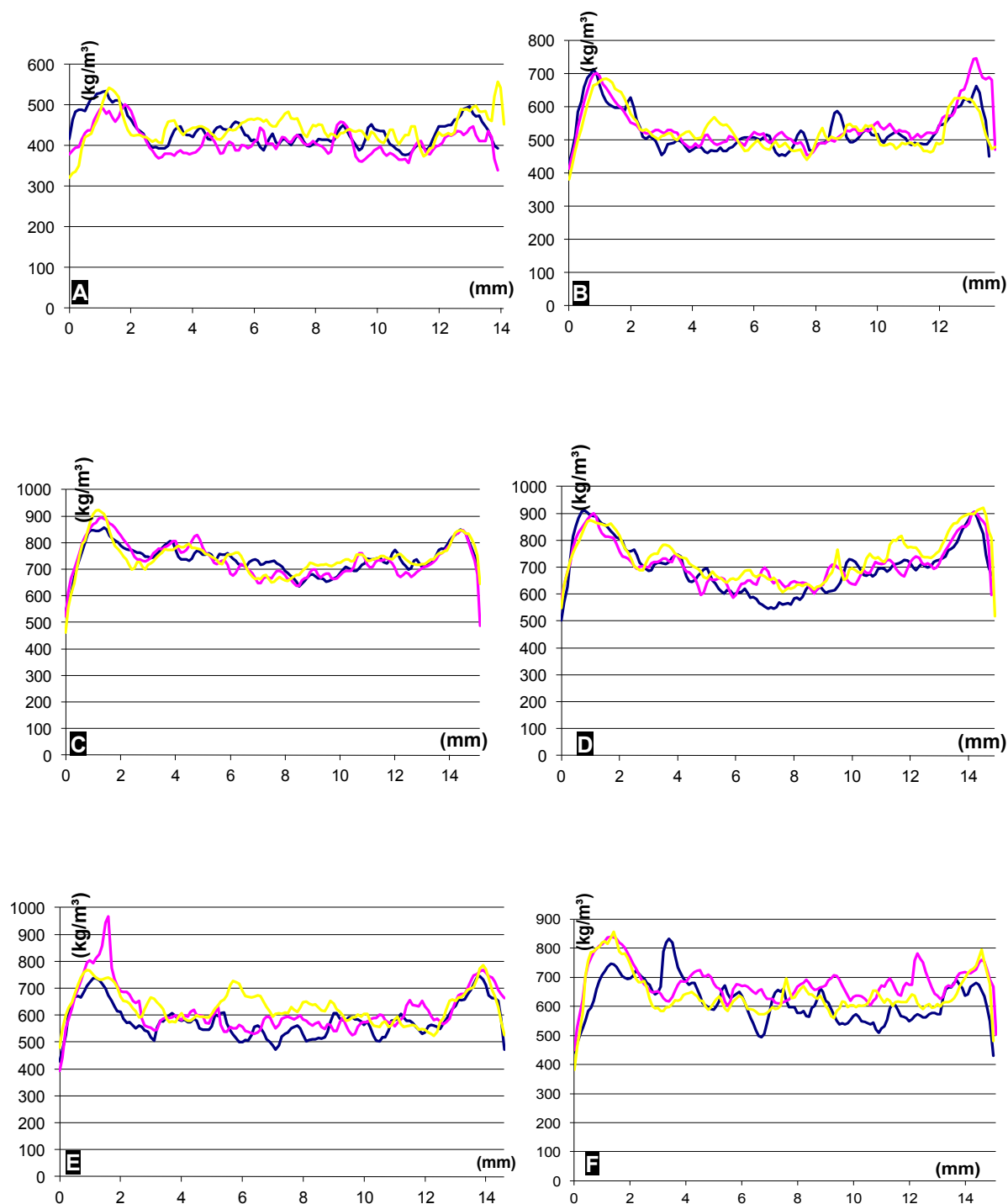


Figura 33 – Perfis, densitômetro Joyce LoebI, com 16% resina. (A) 100% eucalipto, (B) 5% cana-de-açúcar e 95% eucalipto, (C) 10% cana-de-açúcar e 90% eucalipto, (D) 15% cana-de-açúcar e 85% eucalipto, (E) 20% cana-de-açúcar e 80% eucalipto, (F) 25% cana-de-açúcar e 75% eucalipto

Tabela 11 – Densidades máximas, médias e mínimas dos perfis obtidos no densitômetro Joyce LoebI, por etapa e tratamento

Etapa	Condição	Densidades médias (kg m <sup>-3</sup> )		
		máxima	média	mínima
<b>B (13% UF)</b>	100% eucalipto	701 a	557 a	394 a
	5% cana / 95% eucalipto	764 ab	643 b	446 ab
	10% cana / 90% eucalipto	859 cd	727 c	535 c
	15% cana / 85% eucalipto	894 d	748 c	508 bc
	20% cana / 80% eucalipto	794 bc	658 b	415 a
	25% cana / 75% eucalipto	700 a	543 a	401 a
<b>B (16% UF)</b>	100% eucalipto	531 a	429 a	346 a
	5% cana / 95% eucalipto	715 b	532 b	408 a
	10% cana / 90% eucalipto	891 c	736 d	510 bc
	15% cana / 85% eucalipto	905 c	711 d	544 c
	20% cana / 80% eucalipto	833 bc	610 c	434 ab
	25% cana / 75% eucalipto	842 bc	646 c	424 ab

Valores médios de densidade. Letras diferentes em uma mesma coluna, para cada tratamento, diferem entre si ao nível de 5% de probabilidade (teste Tukey).

#### 4.2.2 Caracterização dos painéis por espectroscopia no infravermelho próximo (NIR)

Os espectros da face lateral dos painéis obtidos por espectroscopia na faixa de 9.000 a 4.000 cm<sup>-1</sup> do infravermelho próximo (NIR) (Figura 34) indicam a variação dos valores de absorvância. A faixa de 5,920-5,950 cm<sup>-1</sup> é indicativa do componente químico lignina (WORKMAN; WEYWER, 2007), com os espectros apresentando diferenças nos valores de absorvância dos diferentes teores de bagaço de cana-de-açúcar utilizados (Figura 34A).

Em outras regiões do espectro podem ocorrer tendências conflitantes que, possivelmente, refletem as variações da composição química dos painéis e a interação das partículas do bagaço de cana-de-açúcar, fibras de eucalipto e dosagens de resina.

Na análise e interpretação das informações são aplicadas ferramentas estatísticas, como a Análise de Componentes Principais (PCA) (RODRIGUES, 2007; FUJIMOTO et al., 2008) que indicam, pela dispersão dimensional das amostras dos painéis de fibras de eucalipto e partículas de bagaço de cana-de-açúcar (Figura 35), que os componentes principais PC1 e PC2 representaram 73% da variabilidade.

A porcentagem de partículas de bagaço de cana-de-açúcar dos painéis apresentou alto coeficiente de determinação em relação aos valores aplicados experimentalmente e os indicados através do NIR. Através dos espectros de absorvância é possível estimar o teor de bagaço de cana-de-açúcar com um erro de previsão de 1,5%; o espectro da face lateral dos painéis após o lixamento apresentou a melhor estatística do modelo, com o coeficiente de determinação dos valores mensurados e o modelo ( $R^2_{cv}$ ) de 0,99, e a raiz média do erro padrão (RMSECV) de 0,97. O tratamento da face lateral pelo lixamento parece estar relacionada com maior exposição das fibras e homogeneização da superfície analisada pela radiação NIR.

A metodologia NIR foi aplicada Campos et al. (2009) possibilitando discriminar as classes de composição dos painéis aglomerados de partículas de madeira de eucalipto e pinus, com bagaço de cana-de-açúcar. Da mesma forma, Hein et al. (2011) utilizaram NIR na análise de painéis aglomerados de partículas de eucalipto, pinus e de bagaço de cana-de-açúcar, obtendo coeficiente de determinação de 0,72-0,80 e de 0,46-0,79 para as propriedades físicas e mecânicas, respectivamente, com a melhor correlação para a resistência à tração perpendicular. A aplicação da metodologia NIR é recomendada pelos autores como potencial na análise das propriedades tecnológicas de painéis MDP de composição não conhecida.

Os painéis de partículas de bagaço de cana-de-açúcar são distinguidos pela PCA, através dos espectros NIR, com fundamento nos diferentes padrões de resposta. Os modelos estimaram o teor de partículas de bagaço de cana-de-açúcar nos painéis com elevado coeficiente de determinação (0,96) entre o previsto e o determinado pelo NIR.

Para aplicação prática, os modelos NIR do espectro de painéis sólidos, em relação aos painéis moídos, são recomendados permitindo a identificação da porcentagem de partículas de bagaço de cana-de-açúcar (ou de outra matéria prima) “on line” no processo de fabricação e na predição do MOE e MOR dos painéis em relação ao método clássico (RIALS et al., 2002).



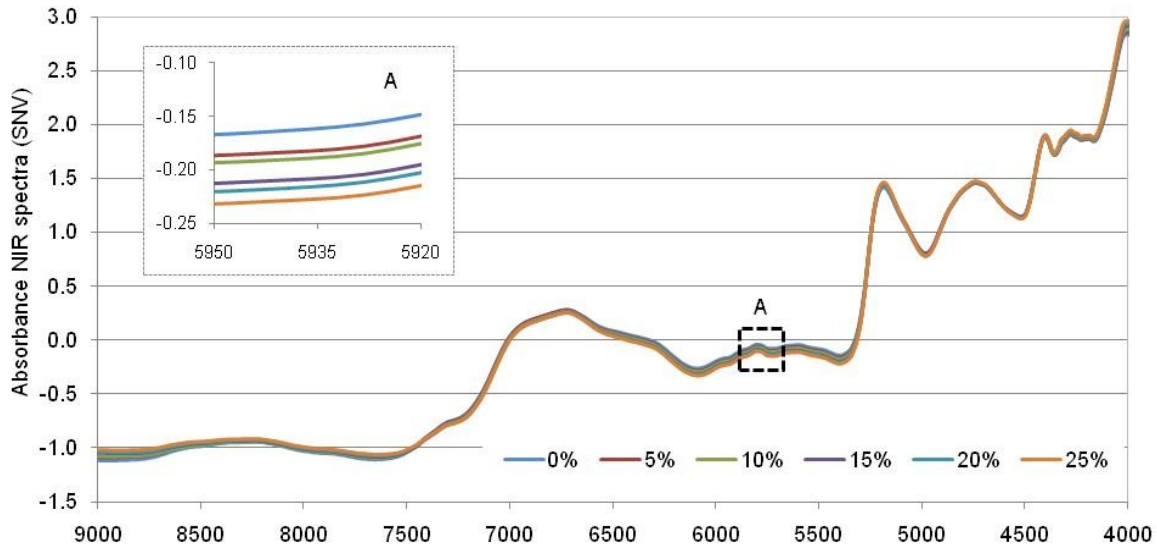


Figura 34 – Espectros NIR obtidos dos painéis sólidos, com comprimento de onda entre 9.000 a 4.000  $\text{cm}^{-1}$

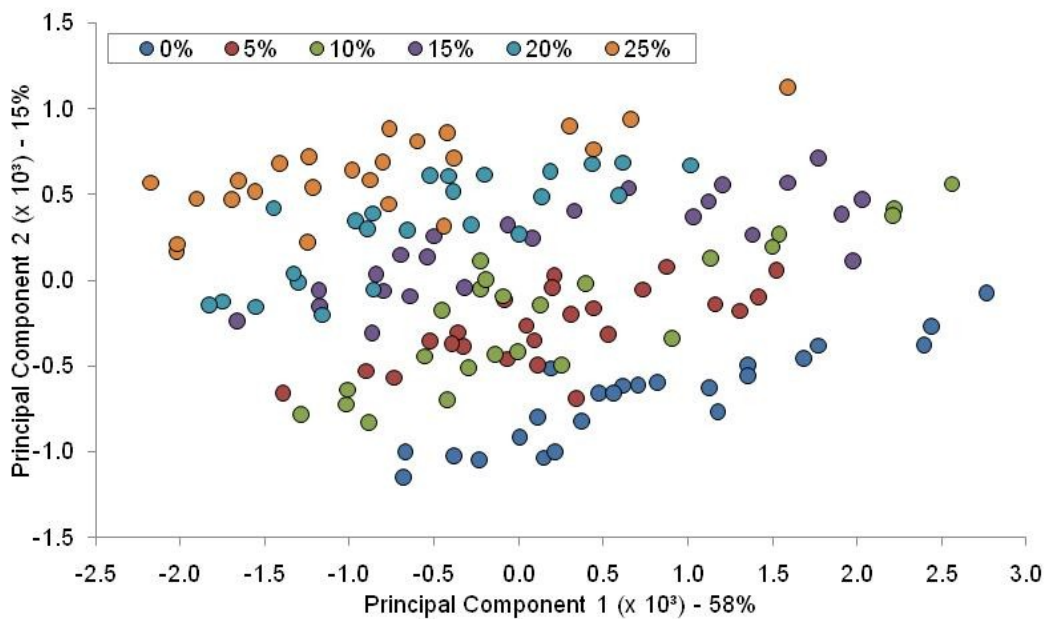


Figura 35 – Gráfico da dispersão dimensional das amostras com diferentes percentuais de partículas de bagaço de cana-de-açúcar

## 4.2.3 Caracterização das propriedades físico-mecânicas

### 4.2.3.1 Etapa A

Os resultados da avaliação das propriedades físico-mecânicas dos painéis confeccionados com percentual de fibras de eucalipto e partículas de cana-de-açúcar (0-100%, faixas de 25%), na etapa experimental A (Tabela 12) indicam que:

**Espessura:** não houve diferenças estatísticas significativas entre os valores médios de espessura, indicativo da eficiência do ciclo de prensagem; a calibração da espessura dos painéis foi feita pela prensa através do ciclo e da espessura nominal indicada, não sendo utilizados separadores.

**Densidade:** a densidade aparente de  $628 \text{ kg m}^{-3}$  dos painéis com 100% de partículas de cana-de-açúcar foi estatisticamente inferior à dos demais tratamentos, classificando-os como MDF “Light” ( $< 650 \text{ kg m}^{-3}$ ) (ABNT NBR 15316, 2006b). A densidade baixa desses painéis resultou em efeito negativo nas suas propriedades mecânicas (ex.: módulos de ruptura e de elasticidade), mas indicou a tendência de redução das propriedades mecânicas com o aumento da porcentagem de partículas de bagaço de cana-de-açúcar.

A repetição da confecção dos painéis com 100% de partículas do bagaço de cana não foi possível face à falta de material seco e com morfologia adequada, bem como deve-se considerar a extrema dificuldade na obtenção deste painel através de todas as variáveis estabelecidas na preparação das fibras/partículas e posterior prensagem, que não indicaram problemas relevantes em todos os demais tratamentos propostos. Assim, para esta condição em especial, devem ser avaliadas, através de novas pesquisas, sensíveis alterações em condições de preparação e prensagem para obtenção do painel assim proposto.

**Módulos de ruptura e elasticidade:** os painéis com 100% de partículas de bagaço de cana-de-açúcar não se enquadraram na norma; os painéis com 0-50% de partículas de bagaço de cana-de-açúcar não mostraram diferença significativa, apesar da tendência de diminuição dessa propriedade com o aumento da porcentagem da biomassa alternativa.

Para painéis MDF confeccionados com resíduos agrícolas (50% de fibras de trigo e 50% de fibras de soja), aglutinados com 12% de resina uréia formol, Ye et al. (2007) obtiveram valores de MOR e de MOE de  $28,0$  e de  $3200 \text{ N mm}^{-2}$ , respectivamente, similares aos do presente trabalho.

**Resistência a tração perpendicular e a tração superficial:** o valor médio mais alto foi obtido nos painéis de 50% de partículas de bagaço de cana-de-açúcar. Observa-se grande variação dos resultados com adição das partículas de bagaço,

com a mesma tendência na etapa B quando foram avaliados painéis com menor adição de partículas de cana-de-açúcar (Tabelas 14 e 15). Em relação ao valor da tração superficial dos painéis, observa-se o enquadramento de todos os tratamentos na norma EN 311 (1997), que especifica um mínimo de  $1,2 \text{ N mm}^{-2}$ .

**Resistência ao arrancamento de parafuso no topo e face:** houve similaridade de valores entre os painéis confeccionados com 0-50% de partículas de cana-de-açúcar, embora com redução do desempenho para os painéis com porcentagem acima de 50%, porém todos os tratamentos estão enquadrados na EN 320 (1997) que indica o valor mínimo de 100 e de 80 kg para face e topo, respectivamente. As normas brasileiras para os painéis MDF (NBR 15316, 2006a, 2006b, 2006c) e MDP (NBR 14810, 2002a, 2002b, 2002c) descrevem a metodologia desses ensaios mas não indicam, no entanto, o valor mínimo de enquadramento; da mesma forma para o ensaio de resistência à tração superficial e absorção.

**Inchamento e absorção:** o inchamento dos painéis com 0-100% de partículas de bagaço de cana-de-açúcar mostrou valores médios com diferenças significativas, com o pior desempenho nos painéis com 25% e valor médio acima do máximo da norma; nos tratamentos dos painéis com 0, 75 e 100% não houve diferença estatística. Para a absorção não houve diferença estatística significativa para os painéis de todos os tratamentos.

Ortunõ et al. (2011) classificaram, experimentalmente, partículas de *Arundo donax* - planta cultivada em regiões mediterrânicas para a produção de biomassa (VECCHIET; JODICE, 1996) - em peneiras com aberturas 8-4-2-1-0,25 mm e excluíram partículas retidas na peneira com abertura 8 mm e as que passaram na peneira com abertura 0,25 mm. Os painéis aglomerados confeccionados com 50% de partículas retidas na peneira com abertura 1,0 mm e 50% de partículas retidas na peneira 0,25 mm, condição similar à da presente avaliação, em espessura 10 mm e aglutinados com 8% de resina UF, apresentaram resistência à tração perpendicular média de  $0,26 \text{ N mm}^{-2}$  e inchamento médio de 27,8%, ou seja, desempenho inferior neste quesito aos painéis com 100% partículas de bagaço de cana-de-açúcar (Tabela 12).

Painéis aglomerados de partículas de bagaço da região central do colmo de cana-de-açúcar, morfológicamente similares às do presente estudo, apresentaram melhores propriedades mecânicas (WIDYORINI et al., 2005). A presença de células parenquimáticas e suas características intrínsecas em relação às fibras (parede fina e maior comprimento) induzem maiores deformações e aumentam a superfície de contato na prensagem do painel. As propriedades mecânicas dos painéis foram inferiores às do presente trabalho, devido à aplicação de 8 e 14% de resina, embora compatível com a dosagem utilizada em painéis aglomerados de pinus ou eucalipto.

O coeficiente de variação (CV) obtido para a maioria dos ensaios da Etapa A (Tabela 12) é considerado baixo e médio, de acordo com Garcia (1989 apud GOMES, 1985) para ensaios agrícolas, com CV inferior a 10% indicado como baixo e de 10-20% como médio.

A correlação de Pearson (Tabela 13) das variáveis tecnológicas avaliadas nos painéis indica os valores significativos da variação descrita no eixo y com a do eixo x, com os valores positivos e negativos representando as correlações diretas e indiretas. A resistência ao arrancamento de parafuso dos painéis de fibras de eucalipto e partículas de bagaço de colmos de cana-de-açúcar apresenta correlação com a sua densidade, também verificada por Vassiliou; Barboutis (2005). O resultado dos ensaios de RAPF e de RAPT dos painéis apresentou correlação altamente significativa com as variáveis MOR e MOE dos painéis. O inchamento dos painéis apresenta correlação negativa com a RTP, ou seja, um maior valor de resistência à tração perpendicular resulta em menor inchamento.

Com base nos resultados, como promover um acréscimo nos valores de resistência à tração perpendicular, de MOR e de MOE dos painéis, considerando que as variáveis apresentam correlação altamente significativa com a densidade dos painéis? A alteração da gramatura do colchão de fibras e/ou de partículas na fase anterior à prensagem pode ser recomendada por ser prática, rápida e eficiente, controlando a densidade dos painéis e, desta forma, algumas de suas principais propriedades mecânicas. Porém, deve-se considerar o aumento do custo final do painel.

Tabela 12 - Propriedades tecnológicas dos painéis, etapa A, dosagem UF em 14%

Variáveis Tecnológicas	Partículas de cana-de-açúcar (%), dosagem UF em 14%					ABNT NBR 15316
	0	25	50	75	100	
<b>Espessura (mm)</b>	<b>14,8 a</b> (14,2-15,0) (0,3) (1,9)	<b>14,7 a</b> (14,0-15,1) (0,4) (2,9)	<b>15,0 a</b> (15,6-14,3) (0,4) (2,8)	<b>15,4 a</b> (16,7-15,1) (0,7) (4,4)	<b>15,3 a</b> (16,4-14,7) (0,6) (4,1)	
<b>Densidade aparente (kg m<sup>-3</sup>)</b>	<b>781 a</b> (821-726) (35) (4,4)	<b>750 a</b> (815-640) (63) (8,4)	<b>760 a</b> (795-712) (30) (3,9)	<b>718 a</b> (792-652) (55) (7,6)	<b>628 b</b> (688-553) (54) (8,6)	
<b>Módulo de ruptura (N mm<sup>-2</sup>)</b>	<b>30,7 c</b> (35,9-27,8) (2,9) (9,3)	<b>32,4 c</b> (34,7-28,7) (2,9) (8,8)	<b>29,4 c</b> (31,6-28,8) (1,2) (4,2)	<b>22,9 b</b> (26,7-18,6) (4,2) (18,1)	<b>14,3 a</b> (15,1-13,4) (1,2) (8,3)	mínimo 20 N mm <sup>-2</sup>
<b>Módulo de elasticidade (N mm<sup>-2</sup>)</b>	<b>3330 a</b> (3607-2812) (295) (9,0)	<b>3459 a</b> (3728-3230) (204) (5,9)	<b>3101 ab</b> (3267-2962) (137) (4,3)	<b>2558 b</b> (2969-2065) (480) (18,4)	<b>1736 c</b> (1879-1592) (203) (11,7)	mínimo 2200 N mm <sup>-2</sup>
<b>Resistência a tração perpendicular (N mm<sup>-2</sup>)</b>	<b>0,74 ab</b> (0,84-0,62) (0,08) (11,4)	<b>0,58 ab</b> (0,68-0,44) (0,09) (15,3)	<b>0,80 a</b> (0,85-0,73) (0,05) (6,1)	<b>0,68 abc</b> (0,77-0,61) (0,09) (12,8)	<b>0,56 b</b> (0,66-0,58) (0,15) (26,2)	mínimo 0,55 N mm <sup>-2</sup>
<b>Resistência a tração superficial (N mm<sup>-2</sup>)</b>	<b>1,60 ab</b> (1,74-1,44) (0,09) (5,9)	<b>1,38 b</b> (1,60-1,09) (0,22) (16,2)	<b>1,85 a</b> (2,03-1,67) (0,13) (7,2)	<b>1,63 ab</b> (1,81-1,29) (0,18) (12,8)	<b>1,40 b</b> (1,55-1,29) (0,11) (7,9)	
<b>Resistência ao arrancamento de parafuso topo (kgf)</b>	<b>152 a</b> (185-125) (24) (16,0)	<b>136 ab</b> (159-98) (27) (19,4)	<b>152 a</b> (182-137) (21) (13,5)	<b>108 ab</b> (124-98) (16) (14,8)	<b>91 b</b> (94-88) (4) (4,7)	
<b>Resistência ao arrancamento de parafuso face (kgf)</b>	<b>156 a</b> (171-135) (14) (9,0)	<b>133 ab</b> (164-106) (26) (19,3)	<b>141 ab</b> (159-126) (14) (9,9)	<b>111 bc</b> (121-107) (8) (7,5)	<b>79 c</b> (82-76) (4) 5,4)	
<b>Inchamento (%)</b>	<b>11,4 b</b> (12,1-10,7) (0,5) (4,1)	<b>13,4 a</b> (16,5-11,3) (1,9) (14,4)	<b>8,6 c</b> (9,4-7,6) (0,7) (7,8)	<b>10,5 b</b> (11,3-9,0) (0,8) (8,0)	<b>10,5 b</b> (11,1-9,6) (0,6) (6,1)	máximo 12,0 %
<b>Absorção (%)</b>	<b>49,4 a</b> (55,2-44,6) (3,8) (7,7)	<b>64,0 a</b> (90,3-51,5) (14,4) (22,5)	<b>49,7 a</b> (54,5-45,3) (3,1) (6,3)	<b>60,5 a</b> (78,0-51,1) (10,4) (17,2)	<b>59,4 a</b> (67,9-56,2) (5,7) (9,6)	

Valores médios seguidos de (máxima; mínima) (desvio padrão) e (coeficiente de variação); em uma mesma linha, médias seguidas de ao menos 1 letra igual não diferem entre si ao nível de 5% de probabilidade (teste Tukey).

Tabela 13 – Correlação de Pearson entre as variáveis físico-mecânicas dos painéis, etapa A

Variáveis Tecnológicas	E (mm)	D (kg m <sup>-3</sup> )	MOR (N mm <sup>-2</sup> )	MOE (N mm <sup>-2</sup> )	RTP (N mm <sup>-2</sup> )	RTS (N mm <sup>-2</sup> )	RAPT (kgf)	RAPF (kgf)	I (%)	A (%)
E (mm)	-	-0,19	-0,36	-0,37	-0,89	-0,43	-0,41	-0,45	-0,25	-0,14
D (kg m <sup>-3</sup> )	-0,19	-	0,71	0,68	0,69	0,23	0,59	0,62	0,019	-0,48
MOR (N mm <sup>-2</sup> )	-0,36	0,71	-	0,98	0,32	0,16	0,74	0,82	0,27	-0,093
MOE (N mm <sup>-2</sup> )	-0,37	0,68	0,98	-	0,29	0,075	0,71	0,82	0,28	-0,097
RTP (N mm <sup>-2</sup> )	-0,89	0,69	0,32	0,29	-	0,5	0,44	0,39	-0,46	-0,56
RTS (N mm <sup>-2</sup> )	-0,43	0,23	0,16	0,075	0,5	-	0,29	0,27	-0,35	-0,12
RAPT (kgf)	-0,41	0,59	0,74	0,71	0,44	0,29	-	0,92	0,004	-0,28
RAPF (kgf)	-0,45	0,62	0,82	0,82	0,39	0,27	0,92	-	0,13	-0,19
I (%)	-0,25	0,019	0,27	0,28	-0,46	-0,35	0,004	0,13	-	0,62
A (%)	-0,14	-0,48	-0,093	-0,097	-0,56	-0,12	-0,28	-0,19	0,62	-

$r < 0,367$  = Não Significativo ( $p > 0,05$ );  $r > 0,367$  = Significativo ( $p > 0,05$ );  $r > 0,470$  = Muito Significativo ( $p > 0,01$ );  $r > 0,597$  = Altamente Significativo ( $p > 0,001$ ).

E = espessura (mm); D = densidade (kg m<sup>-3</sup>); MOR = módulo de ruptura (N mm<sup>-2</sup>); MOE = módulo de elasticidade (N mm<sup>-2</sup>); RTP = resistência a tração perpendicular (N mm<sup>-2</sup>); RTS = resistência a tração superficial (N mm<sup>-2</sup>); RAPT = resistência ao arrancamento de parafuso topo (kgf); RAPF = resistência ao arrancamento de parafuso face (kgf); I = inchamento (%); A = absorção (%).

#### 4.2.3.2 Etapa B

Os resultados da avaliação das propriedades físico-mecânicas dos painéis confeccionados com porcentagem de fibras de eucalipto e partículas de cana-de-açúcar (0%-25%, faixas 5% de partículas de cana-de-açúcar), com dosagem de **13% de resina** (Tabela 14) indicam que:

**Espessura:** a variação da espessura média dos painéis nos tratamentos foi de 14,8 a 16,5 mm, respectivamente, com diferença estatística. Esse parâmetro é relacionado com a umidade do colchão na fase anterior à sua prensagem; considerando que as variáveis da prensagem são iguais para todos os tratamentos, a determinação da densidade final dos painéis é importante, sendo que no ensaio não foram utilizados separadores. A maior espessura dos painéis com 5% de partículas do colmo de cana-de-açúcar resultou em diminuição da sua densidade aparente.

**Densidade:** não houve diferença estatística na densidade dos painéis em todos os tratamentos, sendo classificados como MDF “Standard” (ABNT NBR 15316, 2006). O baixo valor dos coeficientes de variação indica a homogeneidade da densidade dos painéis intra e inter tratamentos. Desta forma, a diferença estatística para a espessura dos painéis não afetou a sua densidade e os resultados das suas características físico-mecânicas.

**Módulo de ruptura:** houve diferença estatística significativa, com os painéis de 15% de partículas de bagaço de cana-de-açúcar com melhor desempenho e os de 5 e 10% com pior desempenho, com todos os valores acima da norma e ligeiramente inferior ao de painéis MDF comerciais na Europa, com  $38 \text{ N mm}^{-2}$  (BEKHTA; NIEMZ, 2009); porém similares aos determinados por Aisyah et al. (2012) para painéis MDF de *Hibiscus cannabinus* aglutinados com 12% de resina UF ( $30,3 \text{ MPa}$ ). No Brasil, Torquato et al. (2010) determinaram valores entre  $33 \text{ N mm}^{-2}$  a  $42 \text{ N mm}^{-2}$  para painéis comerciais de diferentes fabricantes e confeccionados com fibras de eucalipto e pinus.

**Módulo de elasticidade:** não houve diferença estatística significativa, com painéis com valores médios de  $3067$  a  $3419 \text{ N mm}^{-2}$ , acima da norma. Painéis aglomerados de partículas de bagaço de cana-de-açúcar e eucalipto, com 12% de resina UF, apresentaram MOE de  $1063 \text{ N mm}^{-2}$  (MENDES et al., 2010), inferior ao presente trabalho. Fibras de *Hibiscus cannabinus* L., obtidas após desfibramento em 7 bar por 5 minutos e aglutinadas com 12% de resina UF, utilizadas na confecção de painéis MDF com 10 mm de espessura e densidade nominal de  $700 \text{ kg m}^{-3}$ , indicaram valores de MOE em  $3619 \text{ MPa}$  (AISYAH et al., 2012) ligeiramente superiores aos da presente avaliação.

**Resistência a tração perpendicular:** houve diferença significativa para os painéis de 15 e 25% de partículas de bagaço de cana-de-açúcar, com todos atendendo à norma. O valor do coeficiente de variação expressa a dispersão dos valores para este parâmetro entre os tratamentos, considerada normal e decorrente da encolagem laboratorial que não reproduz as condições da encolagem em linha industrial, quanto à distribuição uniforme da resina no interior dos painéis, apesar de equipamento excelente e pessoal técnico qualificado.

Valores de ligação interna de painéis MDF comerciais, de diversos fabricantes brasileiros, foram de 0,30 a 0,53 N mm<sup>-2</sup>, segundo Toquato et al. (2009), não se enquadrando nas normas. Por outro lado, painéis aglomerados de partículas de colmos de cana-de-açúcar e de fibras de eucalipto com 12% de resina UF apresentaram valor de 0,85 N mm<sup>-2</sup> (MENDES et al., 2010). Painéis MDP de 15 mm, 700 kg m<sup>-3</sup> de densidade, de diferentes percentuais de partículas de eucalipto, pinus e cana-de-açúcar, com 6, 9 e 12% de resina UF, apresentaram valor de 0,49 N mm<sup>-2</sup> de resistência à tração perpendicular, similar aos dos tratamentos com 0, 10 e 20% de partículas de cana, com CV de 13,8 a 17,6% (HEIN et al., 2011).

**Resistência à tração superficial:** o valor obtido para os painéis para o parâmetro corrobora o do ensaio de resistência à tração perpendicular, sendo que os painéis de 15 e de 25% de partículas de bagaço de cana-de-açúcar não apresentaram diferenças estatísticas sendo que ambos, acrescidos do tratamento 0%, se enquadram na EN 311 (1997), que indica mínimo de 1,2 N mm<sup>-2</sup>.

**Resistência ao arrancamento de parafuso, na face e no topo:** não houve diferença estatística para os painéis de todos os tratamentos, mostrando correlação com a sua densidade (VASSILIOU; BARBOUTIS, 2005) e resistência à tração perpendicular (ECKELMAN; CASSENS, 1985).

**Inchamento:** os painéis de 25% de partículas de bagaço de cana-de-açúcar apresentaram valor médio inferior ao máximo da norma e inchamento 24% inferior ao dos painéis com 100% de fibras de eucalipto. Observou-se uma redução do inchamento dos painéis com o aumento do percentual de partículas de bagaço de cana-de-açúcar, porém com valores médios mais elevados comparativamente aos painéis com 16% de resina (Tabela 15).

**Absorção:** no ensaio de absorção os painéis não apresentam a mesma tendência de redução nos valores com acréscimo de partículas de bagaço de cana, verificada no ensaio de inchamento. Houve similaridade estatística entre todos os tratamentos.

**Umidade:** houve diferença significativa para os tratamentos, na fase anterior à aplicação dos ensaios físico-mecânicos. Observando o valor médio, verifica-se uma



similaridade na dispersão dos valores máximos e mínimos e pequena variação dos médios (6,7 a 7,6%). Os valores de umidade dos painéis atendem a norma EN 622-1 (2003) que indica variação de 4 a 11%, em processo seco.

Nesta etapa B, 64% dos coeficientes de variação das variáveis tecnológicas dos painéis são considerados baixos a médios (GARCIA, 1989 apud GOMES, 1985) sendo que nos ensaios agrícolas, CV inferior a 10% e de 10-20% é indicado como baixos e médios, respectivamente. A resistência à tração perpendicular e de absorção dos painéis apresentaram CV de 20-30%, considerados altos (Tabela 14).

Os resultados da avaliação das propriedades físico-mecânicas dos painéis confeccionados com porcentagem de fibras de eucalipto e partículas de cana-de-açúcar (0-25%, faixas 5% de partículas de cana-de-açúcar), com dosagem de **16% de resina** (Tabela 15) indicam que:

**Espessura e densidade:** similaridade estatística entre todos os tratamentos. Portanto, ambas variáveis não apresentaram influência no comparativo das demais propriedades físico-mecânicas entre os tratamentos.

**Módulo de ruptura:** houve diferença estatística para os tratamentos de 20 e 25% de partículas de bagaço de cana-de-açúcar, com valor inferior ao de 10%, todos com o enquadramento na norma.

**Módulo de elasticidade:** com diferença estatística para o tratamento de 25%, inferior ao de 10% de partículas de bagaço de cana-de-açúcar. O menor valor médio verificado é 43,5% superior ao mínimo indicado em norma.

**Resistência à tração perpendicular:** com diferença estatística para os painéis de 25% ( $0,65 \text{ N mm}^{-2}$ ), inferior em relação aos de 10 e 15% de partículas de bagaço de cana-de-açúcar. Valor de  $0,42 \text{ N mm}^{-2}$  foi obtido em painéis aglomerados de bagaço de cana de açúcar e de aparas de madeira (NIKVASH et al., 2010) e de  $0,43 \text{ N mm}^{-2}$  em painéis MDF de fibras de trigo e 15% de resina uréia formol (HALVARSSON et al., 2008), inferiores aos obtidos no presente trabalho.

**Resistência à tração superficial:** todos os painéis apresentaram valores acima do mínimo indicado na norma EN 311 (1997). Os valores deste parâmetro foram corroborados com literatura (BELINI, 2007) e com a densidade da face externa e interna obtida dos perfis densitométricos (item 4.2.1) indicando a efetiva densificação e a resistência superficial para o acabamento (pintura, lâminas, finish foil e laminados baixa pressão). Os perfis de densidade podem avaliar a qualidade superficial de painéis MDP e MDF sem, no entanto, haver relação quantitativa entre os parâmetros (HOAG, 1992).

**Resistência ao arrancamento de parafusos, na face e topo:** com diferença estatística significativa para o painel de 0%, superior ao de 25% para o arrancamento no topo. Observa-se a queda dos valores médios a partir de 20% de partículas de bagaço de cana-de-açúcar, com alta dispersão dos valores máximo e mínimo e do coeficiente de variação, tornando os valores médios, em sua maioria, similares. O parâmetro arrancamento de parafuso no topo do painel é relacionado com a resistência à tração perpendicular e regido pela norma EN 320 (1997), onde todos os valores observados se encontram atendidos pela especificação.

**Inchamento:** houve redução com o aumento da percentual de partículas de bagaço de cana-de-açúcar, com destaque para os painéis com 20%, similar a dos painéis com 13% de resina, todos com enquadramento na norma.

**Absorção:** não houve diferença estatística entre tratamentos, com valores de 54,7 a 68,1%.

**Umidade:** com diferença estatística nos painéis de 10 e 20% de partículas de bagaço, com pequena variação dos valores médios de 7,3 a 7,8%, em concordância com a norma EN 622-1 (2003) que indica variação entre 4 a 11%.

Nesta etapa, 60% dos coeficientes de variação (CV) das variáveis tecnológicas dos painéis (Tabela 15) são baixos e médios (GARCIA, 1989 apud GOMES, 1985) em relação ao CV de ensaios agrícolas. Os parâmetros arrancamento do parafuso face e topo, inchamento e absorção dos painéis apresentaram CV considerados altos (20-30%).

Tabela 14 - Propriedades tecnológicas dos painéis, etapa B, dosagem UF em 13%

Variáveis Tecnológicas	Partículas de cana-de-açúcar (%), dosagem UF em 13%						ABNT NBR 15316
	0	5	10	15	20	25	
<b>Espessura (mm)</b>	<b>14,8 d</b> (15,3-14,1) (0,4) (2,4)	<b>16,5 a</b> (17,8-14,6) (0,9) (5,4)	<b>15,0 cd</b> (16,1-14,0) (0,7) (4,7)	<b>15,4 bc</b> (17,0-14,3) (0,7) (4,6)	<b>15,8 ab</b> (16,6-14,8) (0,5) (3,3)	<b>15,5 bc</b> (16,7-14,2) (0,7) (4,4)	
<b>Densidade aparente (kg m<sup>-3</sup>)</b>	<b>751 a</b> (839-622) (57) (7,6)	<b>722 a</b> (843-625) (71) (9,9)	<b>750 a</b> (856-598) (75) (10,0)	<b>763 a</b> (826-653) (51) (6,7)	<b>755 a</b> (845-583) (70) (9,2)	<b>764 a</b> (868-653) (61) (8,0)	
<b>Módulo de ruptura (N mm<sup>-2</sup>)</b>	<b>30,2 ab</b> (39,5-18,3) (5,3) (17,4)	<b>24,6 b</b> (32,0-19,1) (4,1) (16,5)	<b>25,1 b</b> (37,8-18,2) (6,4) (25,4)	<b>32,0 a</b> (37,9-26,1) (3,7) (11,6)	<b>29,3 ab</b> (34,0-23,4) (3,3) (11,0)	<b>28,8 ab</b> (39,9-22,0) (7,0) (24,3)	mínimo 20 N mm <sup>-2</sup>
<b>Módulo de elasticidade (N mm<sup>-2</sup>)</b>	<b>3398 a</b> (3833-2204) (440) (12,9)	<b>3067 a</b> (3709-2510) (366) (11,9)	<b>3256 a</b> (3794-2662) (333) (10,2)	<b>3419 a</b> (3942-2727) (383) (11,2)	<b>3213 a</b> (3561-2671) (267) (8,3)	<b>3345 a</b> (3929-2785) (362) (10,8)	mínimo 2200 N mm <sup>-2</sup>
<b>Resistência a tração perpendicular (N mm<sup>-2</sup>)</b>	<b>0,49 b</b> (0,72-0,31) (0,11) (22,9)	<b>0,44 b</b> (0,78-0,25) (0,15) (34,6)	<b>0,52 b</b> (0,78-0,28) (0,15) (29,0)	<b>0,69 a</b> (0,90-0,40) (0,14) (20,9)	<b>0,52 b</b> (0,71-0,27) (0,12) (23,2)	<b>0,68 a</b> (0,84-0,48) (0,10) (14,2)	mínimo 0,55 N mm <sup>-2</sup>
<b>Resistência a tração superficial (N mm<sup>-2</sup>)</b>	<b>1,23 b</b> (1,48-0,74) (0,23) (18,6)	<b>1,11 b</b> (1,69-0,75) (0,32) (28,4)	<b>1,16 b</b> (1,69-0,68) (0,29) (25,1)	<b>1,59 a</b> (1,96-1,01) (0,26) (16,6)	<b>0,97 b</b> (1,39-0,52) (0,28) (28,9)	<b>1,68 a</b> (2,17-1,22) (0,27) (16,1)	
<b>Resistência ao arrancamento de parafuso topo (kgf)</b>	<b>113 a</b> (146-89) (20) (17,7)	<b>122 a</b> (207-72) (40) (32,7)	<b>119 a</b> (163-84) (22) (18,7)	<b>139 a</b> (172-82) (29) (20,8)	<b>116 a</b> (164-79) (24) (20,9)	<b>130 a</b> (159-102) (19) (14,9)	
<b>Resistência ao arrancamento de parafuso face (kgf)</b>	<b>116 a</b> (169-69) (25) (21,3)	<b>121 a</b> (192-62) (39) (32,4)	<b>118 a</b> (154-93) (23) (19,2)	<b>126 a</b> (156-90) (24) (19,3)	<b>111 a</b> (163-74) (26) (23,1)	<b>130 a</b> (169-103) (24) (18,7)	
<b>Inchamento (%)</b>	<b>13,4 a</b> (17,0-6,3) (3,9) (29,0)	<b>13,8 a</b> (16,6-10,9) (1,8) (13,2)	<b>14,0 a</b> (17,0-7,4) (3,1) (22,4)	<b>13,4 a</b> (16,0-10,6) (1,7) (12,8)	<b>14,7 a</b> (17,8-10,2) (2,0) (13,6)	<b>10,2 b</b> (14,4-4,9) (2,7) (26,5)	máximo 12,0 %
<b>Absorção (%)</b>	<b>67,1 a</b> (100,4-28,6) (19,3) (28,7)	<b>80,4 a</b> (114,3-52,2) (19,2) (23,9)	<b>75,2 a</b> (113,3-44,5) (22,6) (30,0)	<b>71,3 a</b> (89,3-56,1) (9,6) (13,5)	<b>74,5 a</b> (119,5-49,6) (18,6) (25,0)	<b>73,9 a</b> (121,6-41,9) (21,4) (28,9)	
<b>Umidade (%)</b>	<b>6,7 c</b> (7,1-6,3) (0,4) (5,3)	<b>7,5 ab</b> (7,7-7,4) (0,1) (1,6)	<b>6,9 c</b> (7,3-6,7) (0,3) (4,0)	<b>7,1 bc</b> (7,5-6,6) (0,3) (4,4)	<b>6,9 c</b> (7,5-6,5) (0,4) (5,8)	<b>7,6 a</b> (7,9-7,4) (0,2) (2,3)	

Valores médios seguidos de (máxima; mínima) (desvio padrão) e (coeficiente de variação); letras diferentes em uma mesma linha diferem entre si ao nível de 5% de probabilidade (teste Tukey).

Tabela 15 - Propriedades tecnológicas dos painéis, etapa B, dosagem UF em 16%

Variáveis Tecnológicas	Partículas de cana-de-açúcar (%), dosagem UF em 16%						ABNT NBR 15316
	0	5	10	15	20	25	
<b>Espessura (mm)</b>	<b>15,3 a</b> (16,1-14,5) (0,4) (2,9)	<b>15,6 a</b> (16,6-14,6) (0,6) (3,6)	<b>15,3 a</b> (16,2-14,0) (0,5) (3,6)	<b>15,4 a</b> (16,1-14,2) (0,5) (3,5)	<b>15,7 a</b> (16,7-14,3) (0,8) (4,8)	<b>15,5 a</b> (16,7-14,3) (0,7) (4,3)	
<b>Densidade aparente (kg m<sup>-3</sup>)</b>	<b>763 a</b> (882-600) (76) (9,9)	<b>767 a</b> (864-644) (62) (8,1)	<b>795 a</b> (867-688) (51) (6,5)	<b>793 a</b> (850-696) (47) (6,0)	<b>760 a</b> (874-608) (72) (9,4)	<b>775 a</b> (834-617) (50) (6,4)	
<b>Módulo de ruptura (N mm<sup>-2</sup>)</b>	<b>30,6 ab</b> (39,7-21,8) (5,7) (18,6)	<b>30,1 ab</b> (42,1-21,1) (5,6) (18,8)	<b>36,4 a</b> (41,9-28,0) (4,0) (11,0)	<b>34,2 ab</b> (38,1-28,9) (3,6) (10,7)	<b>29,5 b</b> (42,6-22,0) (7,3) (24,7)	<b>27,2 b</b> (35,5-20,0) (5,6) (20,6)	mínimo 20 N mm <sup>-2</sup>
<b>Módulo de elasticidade (N mm<sup>-2</sup>)</b>	<b>3643 a</b> (4136-3015) (292) (8,0)	<b>3533 ab</b> (4150-2721) (380) (10,8)	<b>3732 a</b> (4223-3184) (350) (9,4)	<b>3543 ab</b> (4100-3053) (417) (11,8)	<b>3408 ab</b> (4196-2686) (438) (12,9)	<b>3158 b</b> (3516-2617) (288) (9,1)	mínimo 2200 N mm <sup>-2</sup>
<b>Resistência a tração perpendicular (N mm<sup>-2</sup>)</b>	<b>0,80 ab</b> (1,16-0,46) (0,19) (23,7)	<b>0,71 bc</b> (0,97-0,49) (0,15) (21,5)	<b>0,89 a</b> (1,16-0,64) (0,12) (14,0)	<b>0,88 a</b> (1,04-0,64) (0,12) (13,6)	<b>0,71 bc</b> (0,96-0,46) (0,16) (22,3)	<b>0,65 c</b> (0,90-0,43) (0,11) (16,3)	mínimo 0,55 N mm <sup>-2</sup>
<b>Resistência a tração superficial (N mm<sup>-2</sup>)</b>	<b>1,61 ab</b> (2,12-1,23) (0,33) (20,8)	<b>1,39 b</b> (2,29-0,95) (0,37) (26,5)	<b>1,93 a</b> (2,28-1,51) (0,24) (12,7)	<b>1,74 ab</b> (2,21-1,46) (0,26) (15,1)	<b>1,62 ab</b> (2,50-1,0) (0,46) (28,3)	<b>1,57 ab</b> (2,0-1,03) (0,31) (19,9)	
<b>Resistência ao arrancamento de parafuso topo (kgf)</b>	<b>168 a</b> (229-122) (37) (21,9)	<b>143 ab</b> (185-100) (29) (20,4)	<b>165 ab</b> (219-85) (36) (21,7)	<b>160 ab</b> (196-118) (29) (17,9)	<b>135 ab</b> (186-87) (30) (22,6)	<b>129 b</b> (154-89) (22) (17,1)	
<b>Resistência ao arrancamento de parafuso face (kgf)</b>	<b>152 a</b> (200-99) (35) (22,9)	<b>139 a</b> (188-86) (34) (24,3)	<b>148 a</b> (181-81) (29) (19,9)	<b>155 a</b> (243-122) (35) (22,4)	<b>132 a</b> (168-78) (27) (20,3)	<b>118 a</b> (151-77) (26) (21,9)	
<b>Inchamento (%)</b>	<b>9,8 ab</b> (13,7-3,9) (3,0) (30,6)	<b>10,4 a</b> (13,6-7,1) (1,9) (18,7)	<b>9,8 ab</b> (13,5-5,7) (2,6) (26,5)	<b>9,2 ab</b> (12,2-6,0) (2,1) (22,7)	<b>6,7 c</b> (9,6-3,1) (2,1) (32,1)	<b>7,9 bc</b> (11,4-5,9) (2,0) (25,0)	máximo 12,0 %
<b>Absorção (%)</b>	<b>63,5 a</b> (92,5-30,1) (18,6) (29,2)	<b>68,1 a</b> (94,7-45,4) (16,4) (24,1)	<b>61,3 a</b> (96,4-47,6) (11,5) (18,7)	<b>56,3 a</b> (76,6-38,9) (12,3) (21,8)	<b>54,7 a</b> (81,6-29,3) (16,1) (29,4)	<b>56,2 a</b> (86,6-37,1) (14,4) (25,6)	
<b>Umidade (%)</b>	<b>7,4 ab</b> (7,5-7,2) (0,1) (2,0)	<b>7,8 ab</b> (8,4-7,2) (0,5) (6,4)	<b>7,3 b</b> (7,6-7,1) (0,2) (2,4)	<b>7,4 ab</b> (7,6-7,3) (0,2) (2,0)	<b>7,8 a</b> (7,9-7,6) (0,1) (1,9)	<b>7,7 ab</b> (8,1-7,2) (0,4) (5,2)	

Valores médios seguidos de (máxima; mínima) (desvio padrão) e (coeficiente de variação); letras diferentes em uma mesma linha diferem entre si ao nível de 5% de probabilidade (teste Tukey).

#### 4.2.3.3 Influência da dosagem de resina

Os painéis com 16% de resina, em relação aos de 13% de resina, apresentaram melhores propriedades físico-mecânicas, com diferença estatística significativa entre os tratamentos (Tabela 16). Conforme descrito na metodologia, no processo de encolagem laboratorial, são utilizados bicos aspersores de ar comprimido proporcionando a atomização da resina sobre a massa de fibras em constante agitação. No entanto, o recobrimento das fibras não é efetivo se comparado com o processo industrial, no qual se aplica a “blow line”, sendo comum em laboratório a utilização de resinas em maior dosagem para uma eficiente distribuição.

Ainda, em painéis MDF ou MDP para aplicação interior, a resina representa 30% do seu custo final, sendo necessária a sua otimização; na avaliação de painéis de partículas de bagaço de cana-de-açúcar a utilização de 16% resina implica na avaliação dos custos finais desse novo componente e do painel (PLASTER et al., 2008), face ao aumento da percentual de resina.

Desta forma, face à escassez de bibliografia, há necessidade de pesquisas para a avaliação de doses de resina e de outros aglutinantes com desempenho satisfatório na confecção de painéis de partículas de bagaço de cana-de-açúcar e de fibras de eucalipto e aplicação de novas metodologias de análise para verificar a eficiência do espalhamento e a distribuição da resina nas células, como a microscopia confocal e a espectroscopia de fotoelétrons (PAKDEL et al., 2008).

Os painéis com 13% de resina atenderam a norma NBR 15316 (2006) para uso interior (Tabela 16), exceto para o parâmetro inchamento, acima do valor máximo permitido, devendo apresentar melhor desempenho com o aumento da dosagem do hidrorrepelente emulsão de parafina, que representa cerca de 3% do custo final dos painéis MDF e MDP.

Há indicação de aplicação de 8-12% de resina UF (BENADUCE, 1998; LARH; CAMPOS, 2004), de 11% em painéis MDF de 100% de fibras de eucalipto (KRZYSIK et al., 2001; BELINI et al., 2010) e de 12-15% para painéis MDF de resíduos agrícolas (YE et al., 2007; HOLVARSSON et al., 2008).

Nas camadas interna e externa de painéis aglomerados indica-se a aplicação de 8 e 10% de resina UF, respectivamente (NIKVASH et al., 2010) e de 9 e 11% em painéis aglomerados de partículas de bagaço de cana-de-açúcar e talo de canola (YOUSEFI, 2009).

Painéis de partículas de bagaço de cana-de-açúcar e com 5% de resina fenol formadeído apresentaram, para os parâmetros resistência à tração perpendicular, módulo de ruptura e módulo de elasticidade, valores de 0,31, 13,9 e 1399 N mm<sup>-2</sup>, respectivamente (ROWEL; KEANY, 1991), sendo que a avaliação visual das amostras indicou o rompimento dos painéis em regiões de partículas de bagaço de cana-de-açúcar muito finas, que devem ser removidas no processo de peneiramento. Da mesma forma, painéis aglomerados de partículas de bagaço de cana-de-açúcar com 8% de resina UF apresentaram MOR, MOE e resistência à tração perpendicular de 10, 1600 e 0,2 N mm<sup>-2</sup>, respectivamente (WIDYORINI et al., 2005). Os valores dos 2 trabalhos são inferiores aos do presente, com valores de MOR, MOE e resistência à tração perpendicular em 28, 3279 e 0,56 N mm<sup>-2</sup>, respectivamente (Tabela 14, 13% UF), possivelmente, pela menor percentagem de resina.

Ainda, elevado tempo de prensagem de painéis de fibra (MDF) e de partículas (MDP ou aglomerado), a uma mesma temperatura, pode ocasionar a hidrólise (quebra) da resina amínica com diminuição das suas propriedades mecânicas. O balanço do tempo de prensagem e da dosagem de resina deve ser analisado nas pesquisas científicas de confecção de novos painéis com maior percentagem de resina que, de modo geral, implica em menor tempo de prensagem.

Observa-se, também, nos ensaios de densidade e de resistência à tração perpendicular e superficial que os painéis de 16% de resina apresentaram menor coeficiente de variação, indicativo de sua maior homogeneidade (Tabela 16).

Tabela 16 – Variáveis tecnológicas dos painéis obtidos nos dois diferentes percentuais de resina UF praticados: 13% e 16%

Variáveis Tecnológicas	Dosagem de resina (%/fibra seca)		ABNT NBR 15316
	13	16	
Espessura (mm)	<b>15,5 a</b> (17,8-14,0) (0,8) (5,5)	<b>15,5 a</b> (16,7-14,0) (0,6) (3,9)	
Densidade (kg m <sup>-3</sup> )	<b>751 b</b> (868-583) (65) (8,6)	<b>776 a</b> (882-600) (61) (7,9)	
Módulo de ruptura (N mm <sup>-2</sup> )	<b>28,3 b</b> (39,9-18,2) (5,6) (19,8)	<b>31,4 a</b> (42,6-20,0) (6,1) (19,4)	mínimo 20 N mm <sup>-2</sup>
Módulo de elasticidade (N mm <sup>-2</sup> )	<b>3279 b</b> (3942-2204) (370) (11,3)	<b>3517 a</b> (4223-2617) (395) (11,2)	mínimo 2200 N mm <sup>-2</sup>
Resistência a tração perpendicular (N mm <sup>-2</sup> )	<b>0,56 b</b> (0,90-0,25) (0,16) (28,7)	<b>0,77 a</b> (1,16-0,23) (0,18) (22,8)	mínimo 0,55 N mm <sup>-2</sup>
Resistência a tração superficial (N mm <sup>-2</sup> )	<b>1,29 b</b> (2,17-0,52) (0,37) (28,7)	<b>1,64 a</b> (2,50-0,95) (0,37) (22,6)	
Resistência ao arrancamento de parafuso topo (kgf)	<b>122 b</b> (207-72) (27) (22,4)	<b>151 a</b> (229-85) (34) (22,3)	
Resistência ao arrancamento de parafuso face (kgf)	<b>119 b</b> (192-62) (27) (22,8)	<b>141 a</b> (243-77) (32) (22,8)	
Inchamento (%)	<b>13,3 a</b> (17,8-4,9) (2,9) (22,1)	<b>9,0 b</b> (13,7-3,1) (2,6) (29,2)	máximo 12,0 %
Absorção (%)	<b>73,7 a</b> (121,6-28,6) (18,8) (25,5)	<b>60,1 b</b> (96,4-29,3) (15,5) (25,9)	
Umidade (%)	<b>7,1 b</b> (7,9-6,3) (0,4) (6,0)	<b>7,6 a</b> (8,4-7,1) (0,3) (4,3)	

Valores médios seguidos de (máxima; mínima) (desvio padrão) e (coeficiente de variação); letras diferentes em uma mesma linha diferem entre si ao nível de 5% de probabilidade (teste Tukey).

#### 4.2.3.4 Caracterização dos painéis por análises óticas (deflectometria)

A aplicação da resina epóxi Surf Clear® e do catalisador proporcionou a qualidade altamente refletiva da superfície dos painéis para as análises óticas. Desta forma, foi definido o protocolo de preparação dos painéis e obtenção de superfície vítrea, para o desenvolvimento de novas e pioneiras análises de painéis nas instituições de pesquisas no Brasil.

A metodologia possibilitou a medição direta do campo de inclinação da superfície do painel (370 x 370 mm), implicando em uma diferenciação numérica parcial para a obtenção do campo de curvatura de toda a área do painel e estimando o módulo de elasticidade (MOE).

O valor do módulo de elasticidade pela técnica de deflectometria foi sistematicamente mais elevado e, em média, cerca de 3,5% superior ao do ensaio clássico da NBR 15316-2 (2006b) para os painéis dos tratamentos da etapa B (Tabelas 14 e 15, item 4.2.3.2). Considera-se que esta diferença está compreendida na dispersão esperada da aplicação de metodologia inovadora.

Os valores de MOE obtidos pela norma NBR 15316-3 (2006c) e ensaios óticos para os painéis da etapa B (Tabela 17), indicam maior diferença percentual para os tratamentos 1, 2 e 3, com diferenças entre os métodos de 12,6 a 13,8%, e que deverá ser analisada em próximos ensaios. Para os demais tratamentos, no entanto, os resultados do valor de MOE pelos 2 métodos são próximos.

Como a técnica ótica de deflectometria aplicada para a avaliação experimental do MOE de painéis de madeira foi promissora, em continuidade, as próximas análises deverão otimizar a configuração do ensaio de flexão para a identificação mais robusta dos parâmetros de rigidez de flexão dos painéis, bem como a sua aplicação em amostras de madeira sólida.



Tabela 17 – Variáveis dos tratamentos, valores de MOE obtidos através de determinação clássica (NBR 15316) e por deflectometria, e comparativo % entre os métodos

Trat.	Dosagem UF	Matérias Primas		MOE (NBR 15316)	MOE (Deflectometria)	≠ NBR X Deflectometria
		Fibras de eucalipto	Partículas de cana-de-açúcar			
Nº	%/fibra	%	%	N mm <sup>-2</sup>	N mm <sup>-2</sup>	%
1	13	100	0	3398	3887	12,6
2	16	100	0	3643	4195	13,2
3	13	95	5	3067	3558	13,8
4	16	95	5	3533	3570	1,0
5	13	90	10	3256	3328	2,2
6	16	90	10	3732	3670	-1,7
7	13	85	15	3419	3262	-4,8
8	16	85	15	3543	3615	2,0
9	13	80	20	3213	3312	3,0
10	16	80	20	3408	3352	-1,7
11	13	75	25	3345	3448	3,0
12	16	75	25	3158	3147	-0,3
<b>média</b>				<b>3393</b>	<b>3529</b>	<b>3,5</b>

#### 4.2.4 Caracterização química

##### 4.2.4.1 Teores de sílica

A presença dos cristais de sílica (dióxido de silício ou sílica, SiO<sub>2</sub>), dispostas no interior do painel, entre as células do bagaço de cana-de-açúcar e das fibras de eucalipto, podem ser visualizada através da imagem MEV (Figura 36A). Os cristais de sílica apresentam uma morfologia característica e confirmados pela análise química elementar (Figura 36B) obtida pela sonda do MEV-EDS, com elevado pico de Si, seguido do O<sub>2</sub>.

O teor de sílica varia de 0,007-0,018 a 3% nos painéis de fibras de eucalipto e de 100% de partículas de bagaço de cana-de-açúcar, respectivamente (Tabela 18), com aumento de sua porcentagem em relação ao gradativo aumento das partículas de cana-de-açúcar na composição dos painéis. A literatura indica grande dispersão do teor de sílica no bagaço dos colmos de cana-de-açúcar, variando de 0,7 a 4% (ROWEL; KEANY, 1991; CHEN; HSU, 2002; ROMERO, 2007; CTC, 2011).

A presença de Si nos painéis foi considerada em meados de 2003 no mercado brasileiro, quando da introdução de painéis MDF de 100% de fibras de eucalipto. Na época, os painéis MDF de fibras de eucalipto foram considerados como mais abrasivos no processamento mecânico em equipamentos de corte, em relação aos painéis MDF de pinus, apesar de apresentarem igual teor de sílica. Com a possibilidade de adição de partículas de bagaço de cana-de-açúcar na confecção de painéis em mistura com fibras de eucalipto, o consequente aumento do teor de sílica no painel deve ser analisado como importante parâmetro de qualidade. Neste contexto, sugere-se inclusão da avaliação do desgaste dos materiais de corte nos painéis de fibras e/ou partículas de cana-de-açúcar.

Outros procedimentos de processo, inicialmente em nível laboratorial ou industrial (na mesa de alimentação para a extração do caldo dos colmos), podem ser aplicados, como a lavagem do bagaço de cana-de-açúcar para a retirada de impurezas minerais oriundas da colheita dos colmos de cana-de-açúcar, etapa comumente empregada para os cavacos de madeira de eucalipto na confecção de painéis MDF.

Embora os colmos inteiros da cana-de-açúcar apresentem maior quantidade de impurezas minerais do que os colmos picados em colheitadeiras, no processo de extração do caldo o teor de cinzas chega a 14%, por não passar pelo processo de lavagem para a redução das partículas de solo aderida aos colmos (CTC, 2011).

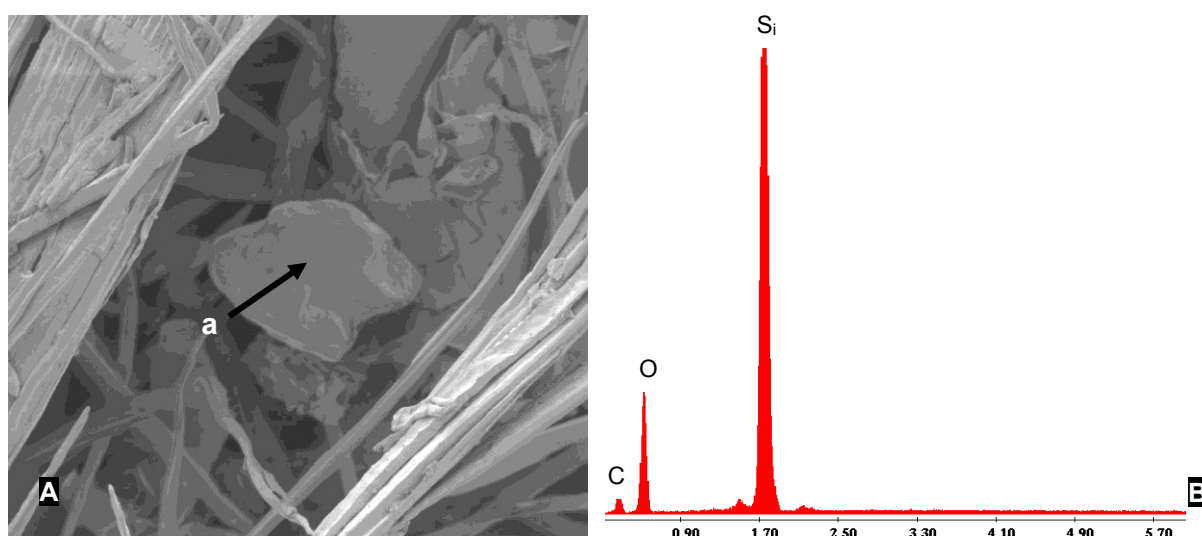


Figura 36 – (A) Partícula de  $\text{SiO}_2$  identificada (a) em imagem MEV (500 x) e (B) análise química elemental indicativa de pico de concentração de  $\text{Si}_i$

Tabela 18 – Teor de sílica (%) nos painéis de diferentes tratamentos, etapas A e B

Etapa	Tratamento	Fibras de eucalipto	Partículas de cana-de-açúcar	Dosagem Resina	Teor de Sílica
		(%)	(%)	(%)	(%)
A	1	100	0		0,007
	2	75	25		0,844
	3	50	50	14	1,633
	4	25	75		2,688
	5	0	100		3,049
Etapa	Tratamento	Fibras de eucalipto	Partículas de cana-de-açúcar	Dosagem Resina	Teor de Sílica
		(%)	(%)	(%)	(%)
B	1			13	0,015
	2	100	0	16	0,018
	3			13	0,206
	4	95	5	16	0,162
	5			13	0,382
	6	90	10	16	0,273
	7			13	0,606
	8	85	15	16	0,585
	9			13	0,803
	10	80	20	16	0,764
	11			13	0,850
	12	75	25	16	0,900

#### 4.2.4.2 Teores de formol livre

Nas etapas A e B dos experimentos verificou-se a redução do teor de formol livre de 2 e 4 mg/100g nos painéis de 25 e 100% de partículas de bagaço de cana-de-açúcar, respectivamente, em relação aos painéis com 100% de fibras de eucalipto (Tabela 19) devido, possivelmente, à liberação de furfural como ácido que reage com o formol presente na resina. Todos os painéis foram enquadrados na classe E2 com valores de emissão de formol livre entre 8-30 mg/100g.

Em linha de produção industrial o maior valor de formol livre dos painéis está diretamente relacionado com a porcentagem de resina e, segundo Markessini et al. (2010), na manufatura dos painéis a maior exposição ao formaldeído ocorre na preparação da cola, na formação e prensagem do colchão e no lixamento.

Nos Tratamentos 1-2, 3-4 e 5-6, verifica-se que, com o mesmo percentual de matéria-prima e variação da porcentagem de resina na manufatura dos painéis, a maior porcentagem (16%) resulta em menor valor de formol livre. Esse efeito pode

estar relacionado ao aumento da porcentagem de umidade do colchão com a utilização de maior dosagem de resina e, desta forma, na fase de prensagem em laboratório, ocorre um aumento da eficiência de transferência de calor da superfície para o interior do colchão, promovendo a cura ou a consolidação mais rápida da resina.

Como o tempo de prensagem do colchão de fibras + partículas é uniforme, o painel consolidado permanece na prensa, por um período maior, em contato com as placas aquecidas. Desta forma, a temperatura interna dos painéis induz uma maior reação das moléculas de formol com as de uréia e com o maior período de cura, resultando na diminuição do formol livre. Nos painéis dos Tratamentos 7-8, 9-10 e 11-12 da etapa B, verificam-se valores similares do teor de formol livre, com variação da dosagem de resina e aumento da porcentagem de partículas de colmo de cana-de-açúcar.

Em painéis MDP de 50% de fragmentos de cones de *Pinus pinea* e de 50% de cavacos de madeira de *Pinus nigra* e *Fagus orientalis*, com 10% de resina UF, a redução significativa da porcentagem de formol livre é atribuída aos compostos fenólicos residuais presentes nos cones (BUYUKSARI et al., 2010); mais recentemente, com o desenvolvimento de resinas aminoplásticas, pode-se obter baixos teores de formol livre na manufatura dos painéis (MARKESSINI et al., 2010).

Da mesma forma, a mistura da resina uréia formaldeído com difenilmetano diisocianato (UF-PMDI) reduz significativamente o teor de formaldeído livre dos painéis. Na China, obteve-se uma redução de 35-60 mg/100 g para menos de 10 mg/100 g com a aplicação de mistura de resinas (6% UF e 1% PMDI), a 175° C, durante prensagem de painéis aglomerados (WANG et al., 2004).

Os resultados do trabalho indicam potencial dos tratamentos e a continuidade das pesquisas direcionadas à redução da emissão do formol livre (BORGES, 2008), com a aplicação de novas metodologias de análise, como a dos espectros NIR para determinação direta do teor de formol livre em amostras de painéis laboratoriais e industriais (ENGSTRÖM, 2008) e em atual projeto de utilização da técnica NIR para monitoramento do teor de formol livre em painéis MDF imediatamente após sua confecção <sup>2</sup>.

---

<sup>2</sup> Informação pessoal

Tabela 19 – Teor de formol livre (mg/100g) nos painéis de diferentes tratamentos, etapas A e B

Etapa	Tratamento	Fibras de eucalipto	Partículas de cana-de-açúcar	Dosagem Resina	Teor de Formol Livre
		(%)	(%)	(%)	(mg/100g)
A	1	100	0		22,6
	2	75	25		20,2
	3	50	50	14	20,0
	4	25	75		18,0
	5	0	100		18,9
Etapa	Tratamento	Fibras de eucalipto	Partículas de cana-de-açúcar	Dosagem Resina	Teor de Formol Livre
		(%)	(%)	(%)	(mg/100g)
B	1	100	0	13	21,0
	2			16	19,0
	3	95	5	13	20,3
	4			16	18,9
	5	90	10	13	20,4
	6			16	19,1
	7	85	15	13	18,6
	8			16	18,3
	9	80	20	13	18,7
	10			16	18,6
	11	75	25	13	16,9
	12			16	18,8

#### 4.2.5 Caracterização dos painéis quanto à durabilidade biológica (bioensaios)

##### 4.2.5.1 Resistência ao ataque de cupins

A intensidade do ataque e a perda de massa dos corpos de prova dos painéis pelos cupins *Reticulitermes santonensis* e sua taxa de sobrevivência são apresentados na Tabela 20 e o aspecto do ensaio e das amostras de painéis expostas aos cupins na Figura 37.

A intensidade de ataque dos cupins, de nível 4, caracterizada como alta, foi similar para os painéis de todos os tratamentos, indicando que a matéria prima (partículas de bagaço de cana-de-açúcar e fibras de madeira) e o percentual de resina não apresentam resistência aos cupins.

Esse comportamento (ataque nível 4) foi verificado em painéis OSB de partículas de madeira de *Cupressus sempervirens* e de *Pinus sylvestris* e sua

mistura com resina melamina uréia formol (MUF) em ensaios com cupins *Reticulitermes santonensis* (AMUSANT et al., 2009).

A taxa de sobrevivência dos cupins nos painéis confeccionados com 13% de resina, nos diferentes tratamentos, variou de 43,6 a 58,9% sem significância estatística. Para os painéis confeccionados com 16% de resina variou entre 37,8 a 60,%, ambas diferindo estatisticamente dos demais, considerada baixa se comparada ao valor de 71% de sobrevivência de cupins *Coptotermes formosanus*, obtido em painéis de fibras de bagaço de cana-de-açúcar (GRACE, 1996).

A elevada susceptibilidade dos painéis ao ataque de cupins impõe a necessidade da aplicação de revestimento protetor da sua superfície ou adição de produtos fungicidas e cupinícidas que, geralmente, vêm misturados à resina.

Apesar dos painéis de 16% de resina UF apresentarem menor perda de massa em relação aos de 13%, verificou-se diferença estatística significativa somente nos painéis de 25% de partículas de bagaço de cana-de-açúcar, não induzindo, desta forma, a resistência dos painéis aos cupins. Do mesmo modo, o acréscimo da porcentagem de partículas de bagaço de cana-de-açúcar não resultou em aumento de perda de massa dos painéis.

A avaliação macroscópica dos corpos de prova dos painéis indicou que o ataque dos cupins foi similar na face externa e interna, mesmo com valores de 1000 e 600 kg m<sup>-3</sup> de densidade, respectivamente. Neste aspecto, painéis MDF de fibras de pinus expostos aos cupins *Reticulitermes flavipes* apresentaram perda de massa de 39 e 50% nas regiões externa e interna, respectivamente (KARTAL; GREEN, 2003).

Tabela 20 – Resultado do ataque de cupins da espécie *Reticulitermes santonensis* nos painéis: perda de massa (%) e taxa de sobrevivência (%) e intensidade do ataque

Partículas de cana-de-açúcar (%)	Perda de massa (%)		Taxa de Sobrevivência (%)		Intensidade do Ataque	
	13% RUF	16% RUF	13% RUF	16% RUF	13% RUF	16% RUF
0	11,0 (0,6-5,0) A a	10,9 (0,8-7,3) A ab	55,3 (11,9-21,5) A a	60,3 (7,4-12,3) A c	4	4
5	11,5 (0,3-2,8) A ab	9,9 (1,1-11,1) A ab	58,9 (2,4-4,1) A a	50,4 (9,8-19,5) A abc	4	4
10	11,9 (1,7-14,6) A ab	10,2 (2,1-20,2) A ab	58,7 (10,4-17,7) A a	49,5 (11,0-22,3) A abc	4	4
15	11,1 (1,2-10,4) A a	11,5 (2,1-18,4) A b	52,0 (8,8-16,9) A a	53,9 (2,9-5,4) A bc	4	4
20	10,5 (1,4-13,3) A a	8,1 (1,7-21,0) A a	43,6 (11,2-25,7) A a	37,8 (2,2-5,8) A a	4	4
25	13,2 (0,6-4,4) B b	11,3 (0,7-5,8) A b	52,8 (9,0-17,1) A a	44,0 (5,2-11,8) A ab	4	4

Valores médios seguidos de (desvio padrão) e (coeficiente de variação). Letras maiúsculas comparam médias entre linhas e letras minúsculas entre valores médios nas colunas. Médias seguidas de ao menos 1 letra igual não diferem entre si ao nível de 5% de probabilidade (teste Duncan).

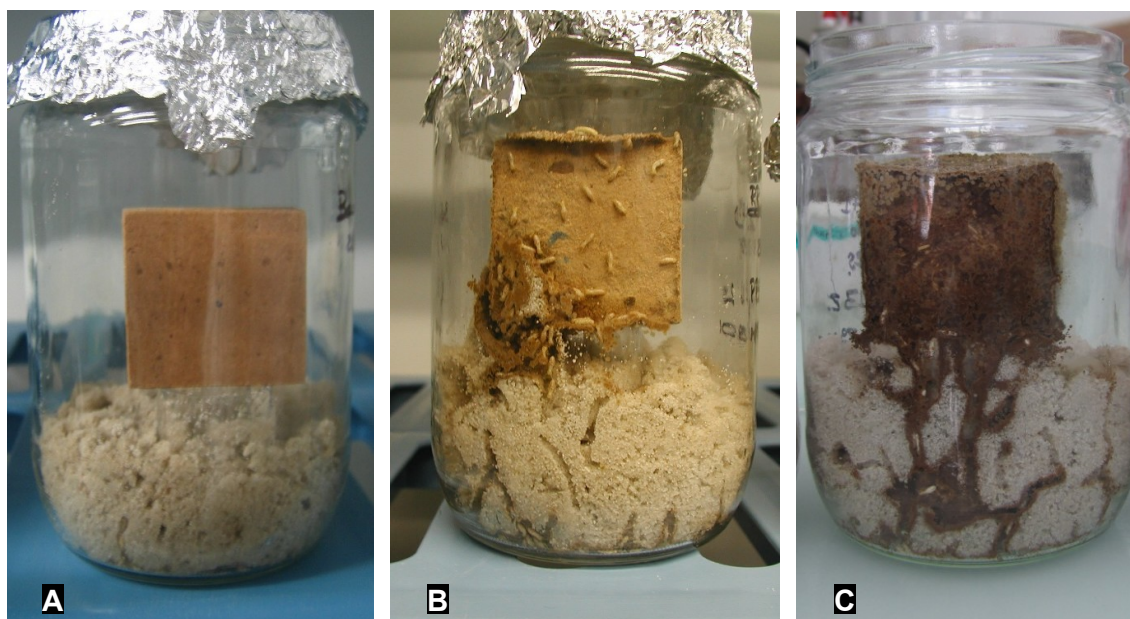


Figura 37 - Painéis submetidos ao ensaio com cupins. (A) início da avaliação, (B) após 4 semanas e (C) após 8 semanas de exposição

#### 4.2.5.2 Resistência ao ataque de fungos

A Tabela 21 indica a perda de massa e o índice de sensibilidade a degradação (ISD) dos painéis ao fungo *Pleurotus ostreatus*, e aspecto do preparo da inoculação e das amostras dos painéis são apresentados na Figura 38.

A perda de massa dos painéis variou de 32,2 a 41,6% para todos os tratamentos, classificando-os como “não resistentes” (norma AFNOR ENV 12038, 2003) ou “pouco resistentes” (TEIXEIRA et al., 2009, apud ASTM D-2017, 1994). Quanto à porcentagem de resina, os painéis de 15 e 20% de partículas de bagaço de cana-de-açúcar mostraram diferença estatística.

A significância estatística da perda de massa dos painéis considerando as porcentagens de resina indicou menor similaridade do valor médio dos tratamentos de 13% de resina sem indicação, no entanto, de aumento da perda de massa dos painéis com acréscimo de até 25% do bagaço de cana-de-açúcar.

A norma AFNOR ENV 12038 (2003) indica, para perda de massa do painel superior a 3%, o cálculo do índice de sensibilidade à degradação (ISD), sendo que igual a 100% significa que os painéis têm a mesma resistência a degradação da madeira de *Pinus sylvestris* e de *Fagus sylvatica*. O valor médio de ISD foi 123,9 a 159,9, indicando que os painéis são 23,9 a 59,9% mais susceptíveis à degradação do que as amostras de madeira. Considerando o ISD, somente os painéis de 15 e 20% de partículas de bagaço de cana-de-açúcar apresentaram diferença estatística significativa.

Os fungos de podridão branca, da classe Basidiomycota, como o *Pleurotus ostreatus*, apresentam maior eficiência de degradação de materiais lignocelulósicos de coníferas e folhosas (FERRAZ, 2004), sendo representadas por mais de mil espécies (ERIKSSON et al., 1990). O fungo de podridão branca *Coniophora puteana* ocasionou 29,7 e 23,5% de perda de massa de painéis OSB de seringueira aglutinados com 5 e 8% de resina UF, respectivamente, (OKINO et al., 2009), inferiores ao do presente trabalho, e sendo classificadas como moderadamente resistentes e resistentes (norma ASTM D 2017-05, 2005).

Da mesma forma, painéis OSB de partículas de *Pinus sylvestris* apresentaram perda de massa de 25,7% e ISD de 119,7 quando expostos ao fungo *Pleurotus ostreatus* (AMUSANT et al., 2009), valor ligeiramente inferior dos painéis de fibras de madeira de eucalipto e de partículas bagaço de cana-de-açúcar.



Painéis expostos aos fungos *Phanerochaete chrysosporium* (podridão branca) e *Tyromyces palustris* (podridão parda) apresentaram 5 e 15% (painéis MDF) e 4 e 8% de perda de massa (painéis aglomerados), respectivamente. A maior perda de massa dos painéis MDF ao fungo da podridão parda foi atribuída à composição de 75% de traqueídes de coníferas (CHUNG et al., 1999).

Painéis MDF aglutinados com resina UF expostos ao fungo *Pleurotus ostreatus* (norma AFNOR 12038) apresentaram índice de sensibilidade a degradação de 100 (CURLING; MURPHY, 1999), inferior ao do presente trabalho. Teixeira et al. (2009) obtiveram ISD de 194 e perda de massa de 67% em painéis aglomerados de palha de cana-de-açúcar submetidos ao ataque de fungos de podridão branca *Trametes versicolor*.

Tabela 21 – Resultado da degradação por fungos da espécie *Pleurotus ostreatus* nos painéis: perda de massa (%) e índice de sensibilidade a degradação (ISD)

Partículas de cana-de-açúcar (%)	Perda de massa (%)		ISD	
	13% RUF	16% RUF	13% RUF	16% RUF
0	37,9 (1,6-4,2) A bc	35,6 (0,2-0,6) A ab	145,8 (6,2-4,2) A bc	136,8 (0,8-0,6) A ab
5	34,7 (2,5-7,3) A ab	32,2 (2,3-7,0) A a	133,3 (9,7-7,2) A ab	123,9 (8,6-7,0) A a
10	41,6 (3,0-7,1) A d	37,6 (2,1-5,5) A b	159,9 (11,4-7,1) A d	144,6 (8,0-5,5) A b
15	35,4 (0,7-2,1) A ab	33,0 (0,6-1,8) B a	136,0 (2,8-2,1) A ab	126,8 (2,3-1,8) B a
20	39,8 (1,0-2,6) A cd	32,4 (2,2-6,9) B a	153,1 (3,9-2,6) A cd	124,3 (8,6-6,9) B a
25	32,2 (0,4-1,2) A a	36,4 (3,5-9,7) A ab	123,8 (1,5-1,2) A a	139,7 (13,6-9,7) A ab

Valores médios seguidos de (desvio padrão) e (coeficiente de variação). Letras maiúsculas comparam médias entre linhas e letras minúsculas entre valores médios nas colunas. Médias seguidas de ao menos 1 letra igual não diferem entre si ao nível de 5% de probabilidade (teste Duncan).

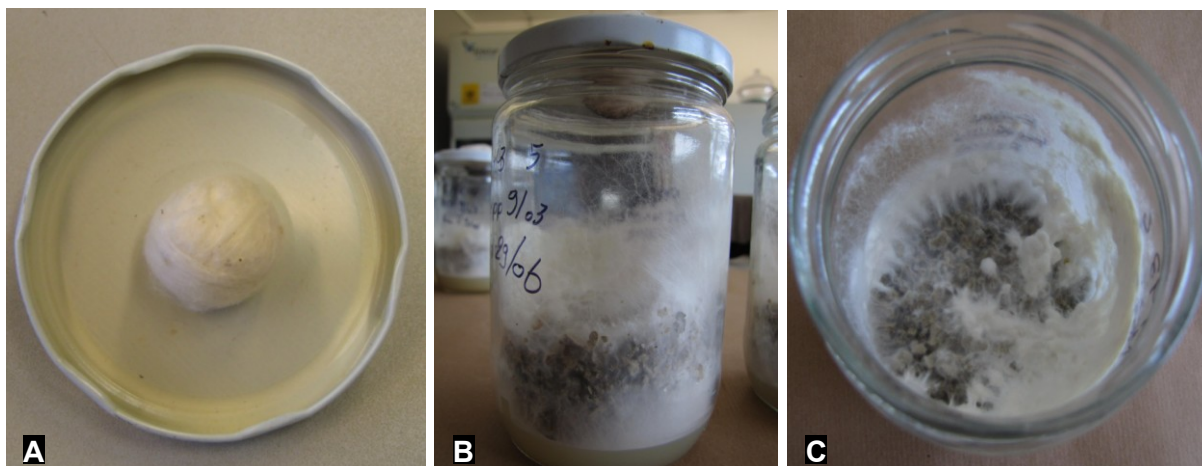


Figura 38 - Aspecto do preparo para inoculação (A) e dos painéis submetidos ao ataque do fungo *Pleurotus ostreatus* após 16 semanas (B, C)

#### 4.2.6 Caracterização anatômica dos painéis através de microscopia eletrônica de varredura (MEV)

##### Etapa A

A análise da região interna dos corpos de prova na seção de ruptura do ensaio de resistência a tração perpendicular evidencia as características anatômico-morfológicas dos painéis de 100% de fibras de eucalipto (fibras e vasos), 100% de partículas de bagaço de cana-de-açúcar (aglomerado de parênquima e feixes de fibras da bainha dos vasos) e sua mistura (Figuras 39A-F) e 14% de resina.

Além da caracterização e diferenciação dos elementos anatômicos dos painéis, pode-se verificar que estão íntegros – ausência de rompimento da parede celular das células - na linha de ruptura dos painéis. A separação dos elementos anatômicos nessa disposição pode indicar a cura parcial da resina na região central dos painéis. No entanto, as análises complementares dos painéis, como o seu ciclo de prensagem e curva de calibração de espessura (Figura 11), perfis de densidade (item 4.2.1.1) e resistência à tração perpendicular (item 4.2.3.1), indicam a efetiva cura da resina UF.

As imagens MEV foram efetivas para verificar aspectos anatômico-morfológicos envolvidos na dinâmica de rompimento dos corpos de prova no ensaio de resistência à tração perpendicular.

## **Etapa B**

A análise da região interna dos corpos de prova, na seção de ruptura do ensaio de resistência à tração perpendicular de painéis com 13% de resina evidencia, da mesma forma da etapa A, as características morfológico-anatômicas dos elementos celulares da madeira de eucalipto e das partículas de colmo de bagaço de cana-de-açúcar. Da mesma forma, verifica-se a existência de espaços vazios na área de contato das diferentes células e menor intensidade de colapso resultante do processo de prensagem dos painéis (Figura 40A-D). No entanto, não há evidências de diferenças na seção de ruptura do ensaio de resistência à tração perpendicular entre as amostras de painéis de 13% (Figura 40A-D) e 16% de resina (Figura 41A-D), conforme similaridade das características morfológico-anatômicas dos elementos celulares nas imagens MEV.

A região externa dos painéis com 13% de resina (Figuras 40E-H) permite evidenciar os elementos anatômicos representativos da madeira de eucalipto e do bagaço de cana-de-açúcar, embora com maior adensamento e compactação pelo efeito de contato com o prato de aquecimento da prensa, em relação à região interna (Figuras 40A-D). A região externa dos painéis com 16% de resina (Figuras 41E-H) indica não haver diferenças na região externa dos painéis, comparativamente aos com 13% de resina.

O tecido de parênquima e os fragmentos da epiderme dos colmos de cana-de-açúcar e as fibras e vasos da madeira de eucalipto encontram-se fortemente aderidos pela análise visual do painel, não sendo facilmente destacáveis, e, desta forma, possibilitando obter bom acabamento superficial após o processo de lixamento dos painéis, para a regularização da sua espessura.

As diferenças da disposição e forma dos elementos celulares nas regiões interna e externa dos painéis refletem na forma dos perfis de densidade e de seus valores, através da análise por densitometria de raios X (item 4.2.1.1) e nas suas propriedades mecânicas, principalmente, quanto à resistência à tração perpendicular. Portanto, as imagens MEV da região interna dos painéis, após os ensaios de resistência à tração perpendicular, foram efetivas para verificar as características morfológico-anatômicas dos elementos e inferir sobre aspectos de ruptura. Na camada externa, permitiu analisar o adensamento e maior compactação dos elementos, comparativamente à região interna, corroborando com os perfis densitométricos (item 4.2.1.1).

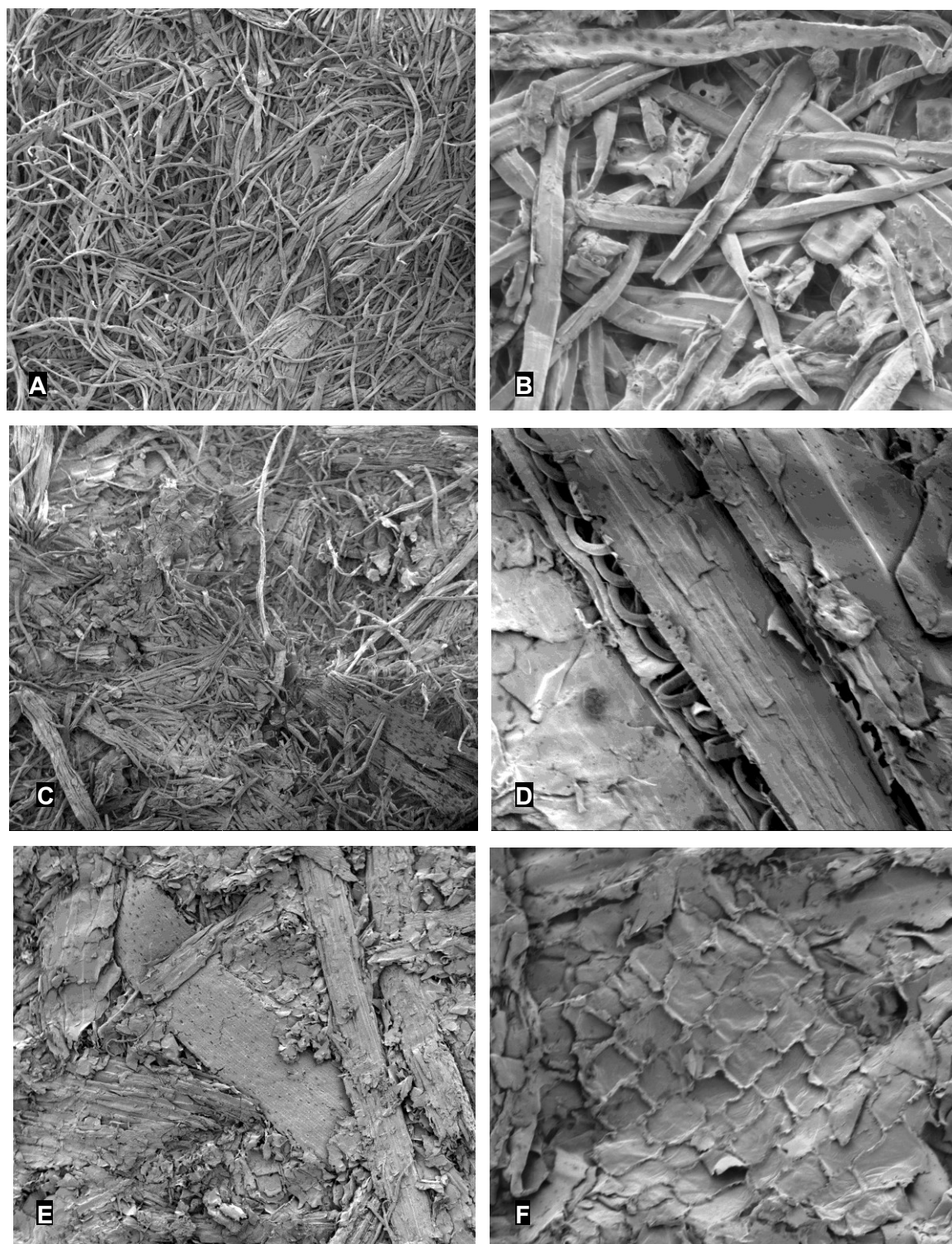


Figura 39 – Etapa A, aspecto da região interna de painel. (A) e (B) painel confeccionado com 100% fibras de eucalipto (100 e 800 x); (C) e (D) painel confeccionado com 50% fibras de eucalipto/50% partículas de bagaço de cana-de-açúcar (100 e 800 x); (E) e (F) painel confeccionado com 100% partículas de bagaço de cana-de-açúcar (100 e 800 x)

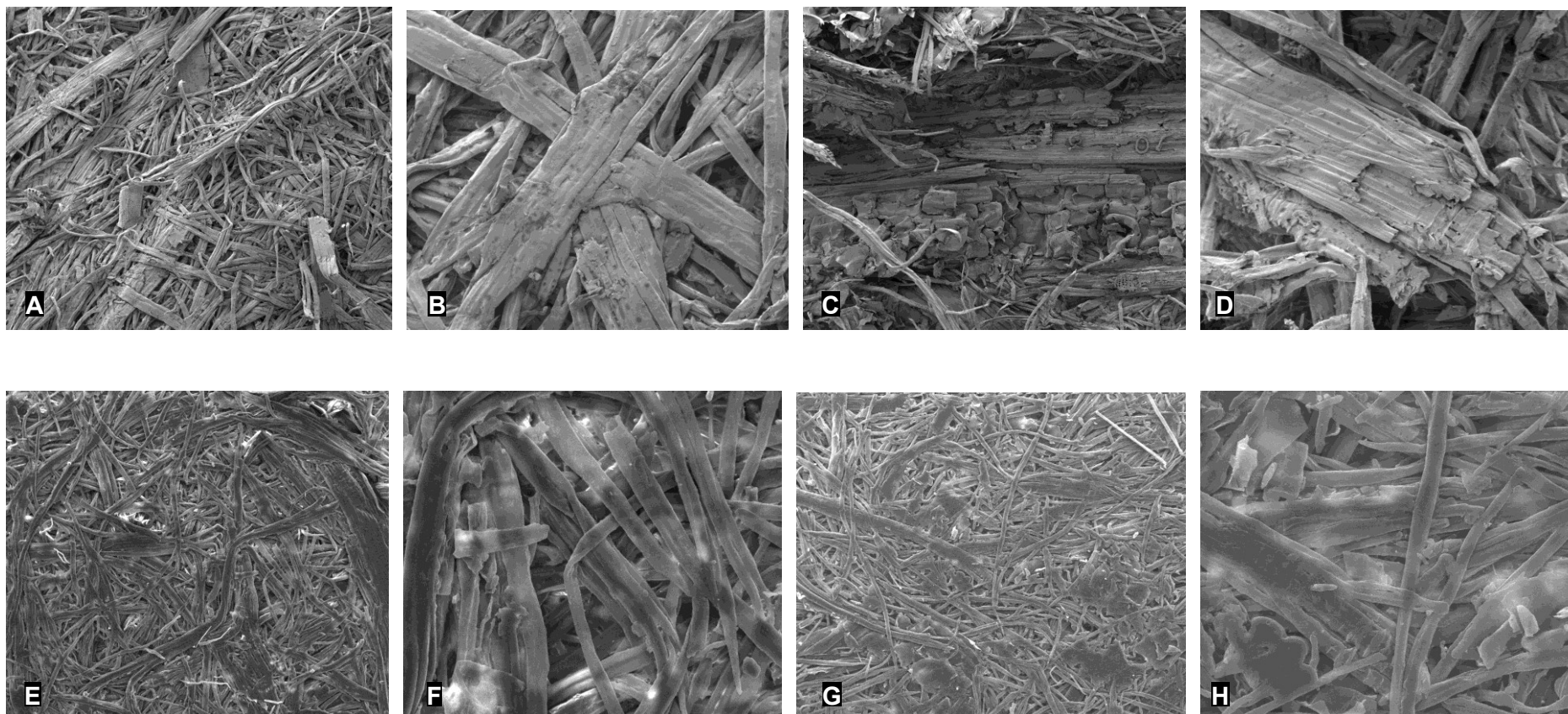


Figura 40 – Etapa B. 13% UF. Aspecto visual da região interna do painel. (A) e (B) 100% eucalipto (150 e 600 x); (C) e (D) 25% cana/75% eucalipto (150 e 600 x); Aspecto superficial do painel. (E) e (F) 100% eucalipto (150 e 600 x); (G) e (H) 25% cana/75% eucalipto (150 e 600 x)

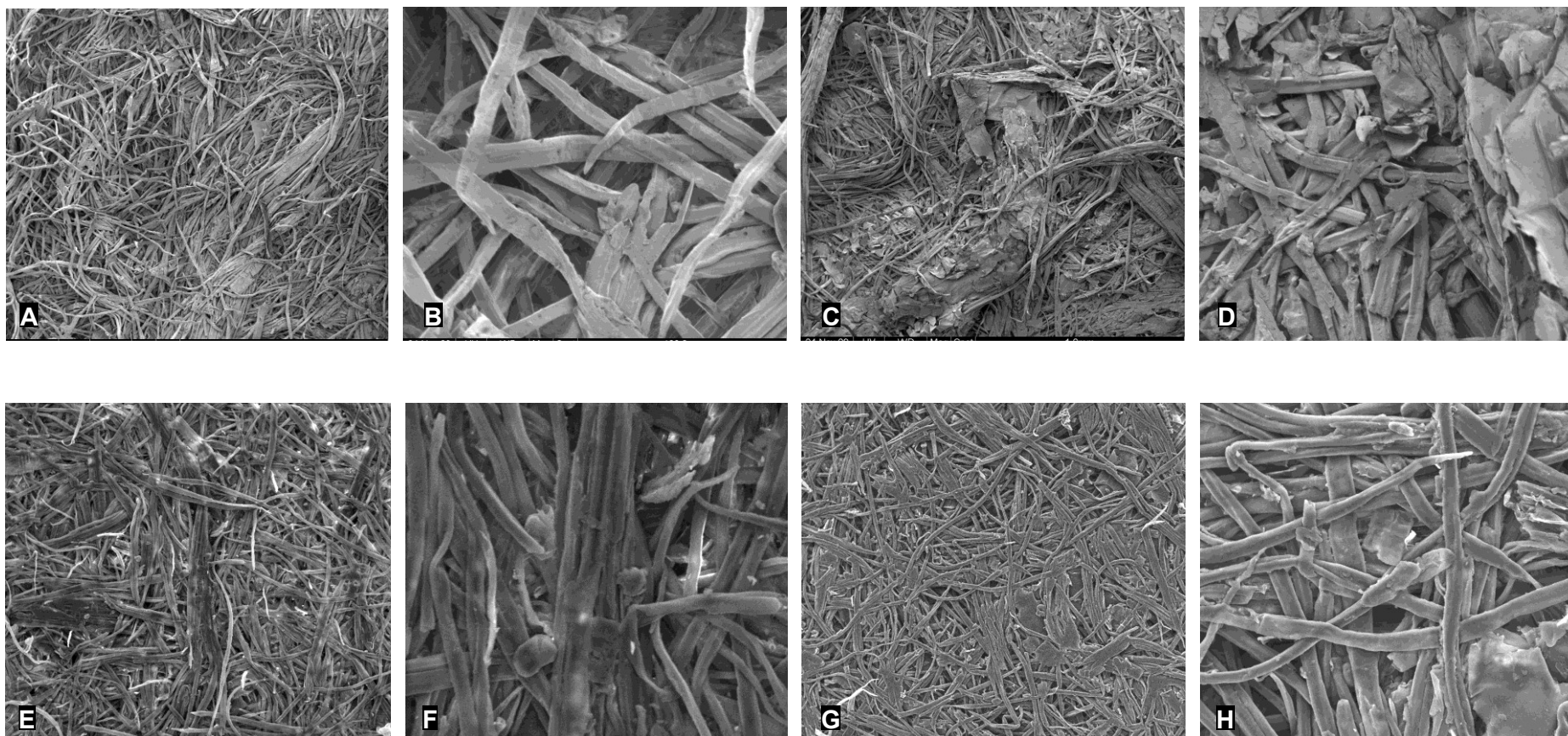


Figura 41 – Etapa B. 16% UF. Aspecto visual da região interna do painel. (A) e (B) 100% eucalipto (100 e 800 x); (C) e (D) 25% cana/75% eucalipto (100 e 600 x); Aspecto superficial do painel. (E) e (F) 100% eucalipto (150 e 800 x); (G) e (H) 25% cana/75% eucalipto (150 e 600 x)

#### 4.2.7 Caracterização dos painéis por microtomografia de raios X (microCT)

A aplicação da microCT como método não destrutivo na análise da estrutura interna dos painéis de madeira e da madeira sólida permite a caracterização da estrutura interna e avaliação das variáveis do processo e da matéria prima. Walther et al. (2006) indicam, ainda, a aplicação de corantes específicos para a avaliação do recobrimento da resina na superfície da parede dos elementos anatômicos constituintes do painel.

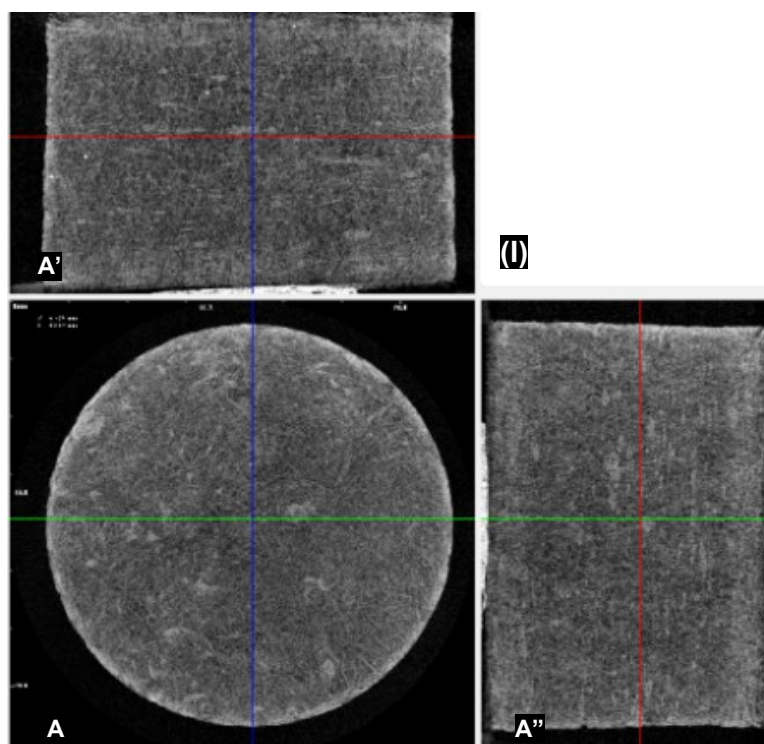
As imagens da estrutura interna dos painéis de fibras de madeira de eucalipto e de partículas de bagaço de cana-de-açúcar e sua mistura, obtida por microCT (Figura 42I-V) indicam (i) a composição anatômica das matérias primas, caracterizadas pela homogeneidade da matriz fibrosa e pela presença de partículas em conjunção com espaços vazios nos painéis de 100% fibras de eucalipto e partículas de cana-de-açúcar (Figura 42I,V), respectivamente (ii) a associação desses elementos anatômicos nos painéis de mistura de diferentes porcentagem de fibras de eucalipto e de partículas de cana-de-açúcar (Figura 42II-IV), (iii) a área de contato dos elementos celulares e os espaços vazios no interior dos painéis, (iv) a presença de grânulos de coloração branca somente nos painéis de partículas de bagaço de cana-de-açúcar, indicativos da maior atenuação dos feixes de raios X.

Por outro lado, verifica-se o aumento da freqüência desses grânulos nos painéis atrelado ao aumento do percentual de partículas de bagaço de cana-de-açúcar em mistura com as fibras da madeira de eucalipto. Esses grânulos claros no interior dos painéis visualizados pelas imagens da microCT possivelmente consistem de aglomerados de células de parênquima comuns na estrutura anatômica dos colmos de cana-de-açúcar e resultantes do processo industrial de esmagamento dos colmos para extração do caldo, e recobertos por resina. As imagens de raios X digital (Figura 29) indicam a ocorrência destas estruturas na matriz fibrosa das partículas de bagaço de cana-de-açúcar e, na seqüencia, como parte dos painéis.

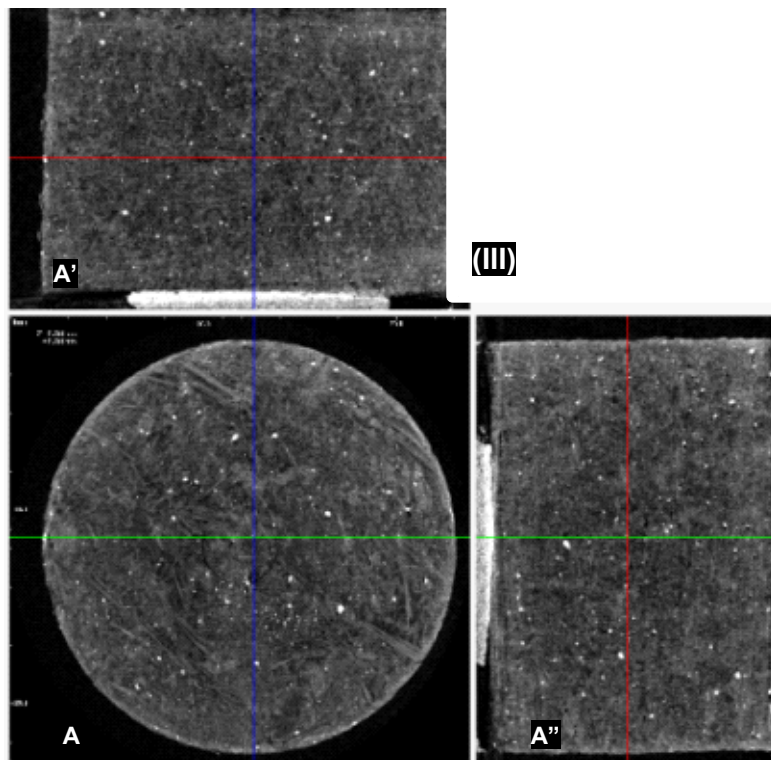
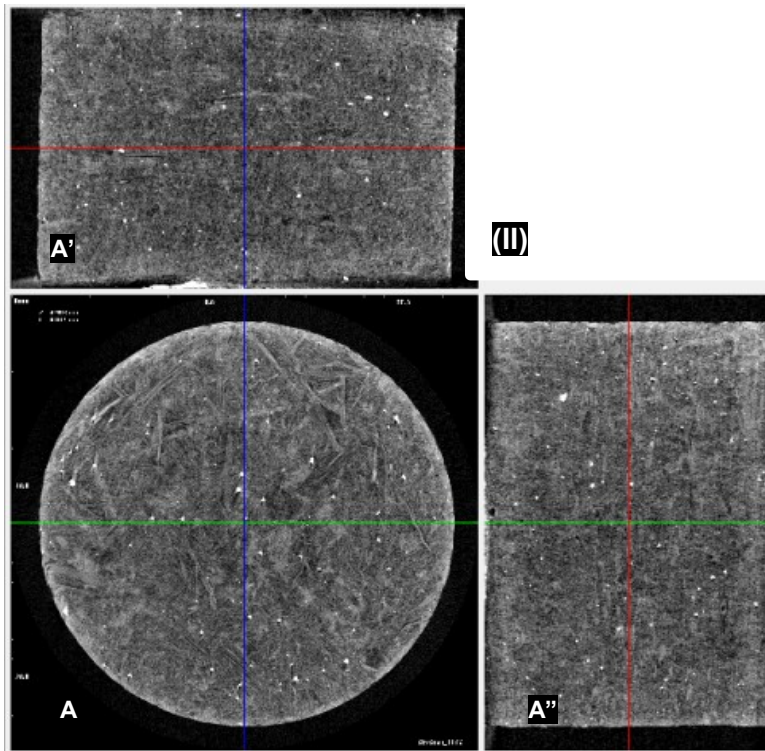
As imagens microCT indicam uma estrutura anatômica homogênea dos painéis de fibra de eucalipto e de partículas de cana-de-açúcar; ao contrário, as imagens microCT da madeira evidenciam com significativo contraste a estrutura anatômica da madeira e a diferenciação das fibras, vasos e parênquima (BELINI et al., 2011b).

A aplicação da microCT nas regiões interna e externa de painéis MDF de fibras (Figura 43A,B) e MDP de partículas (Figura 43C,D) de madeira de eucalipto,

indicam diferenças de homogeneidade e de compactação das fibras, bem como diferentes atenuações de raios X. Para painéis MDP é possível verificar clara diferenciação entre as regiões central e superficial: neste tipo de painel e notadamente na região central – ou camada interna (CI) - do mesmo, composto por partículas de morfologia mais grosseira comparativamente à superfície – ou camada externa (CE) - e com maior porcentagem de espaços vazios, há diferentes e contrastantes atenuações dos feixes de raios X entre os elementos.







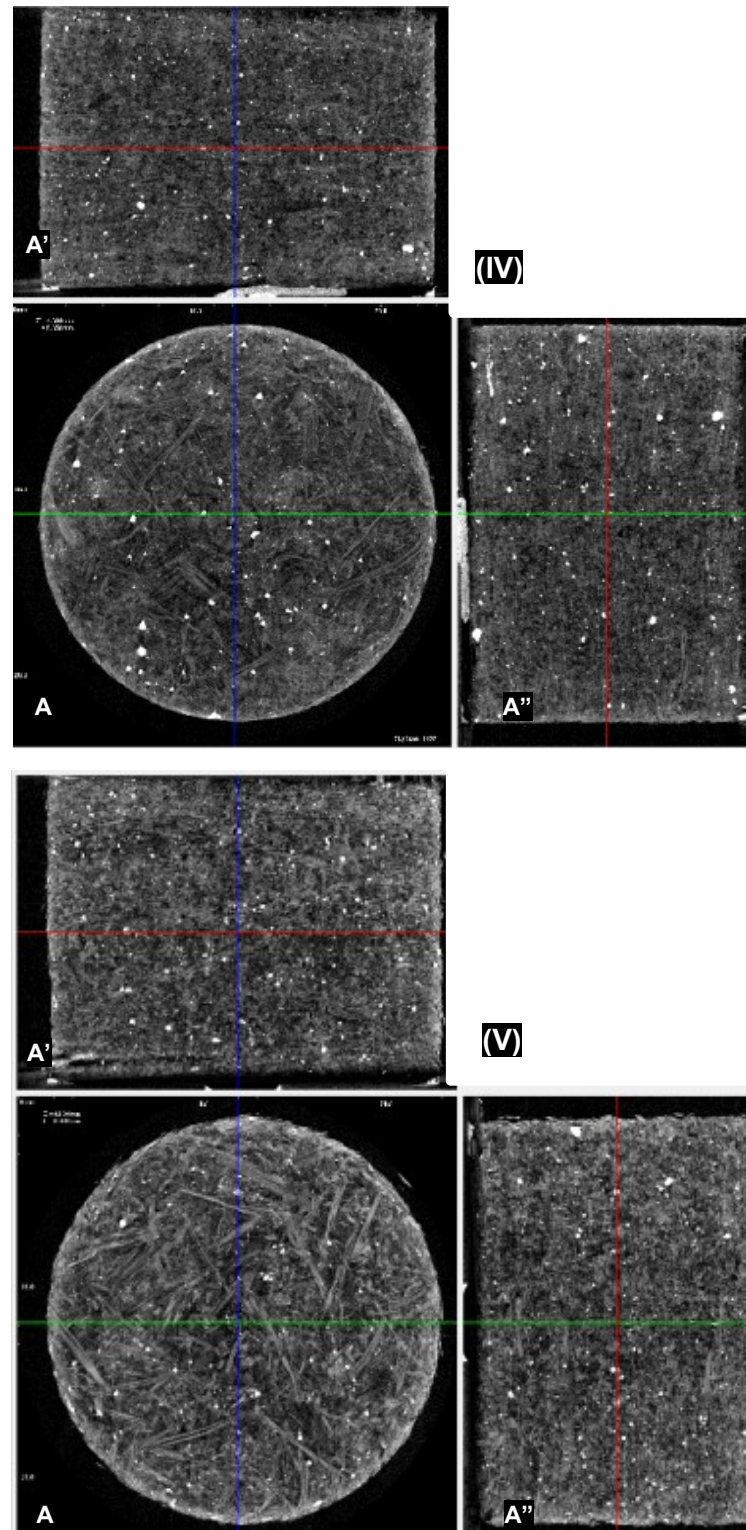


Figura 42 – Imagens microCT de painéis. (A, A', A'') planos transversal e longitudinais radial e tangencial. Painel de (I) 100% de fibras de madeira de eucalipto; (II) 25% de bagaço de cana-de-açúcar e 75% de fibras de eucalipto; (III) 50% de bagaço de cana-de-açúcar e 50% de fibras de eucalipto; (IV) 75% de bagaço de cana-de-açúcar e 25% de fibras de eucalipto; (V) 100% de bagaço de cana-de-açúcar

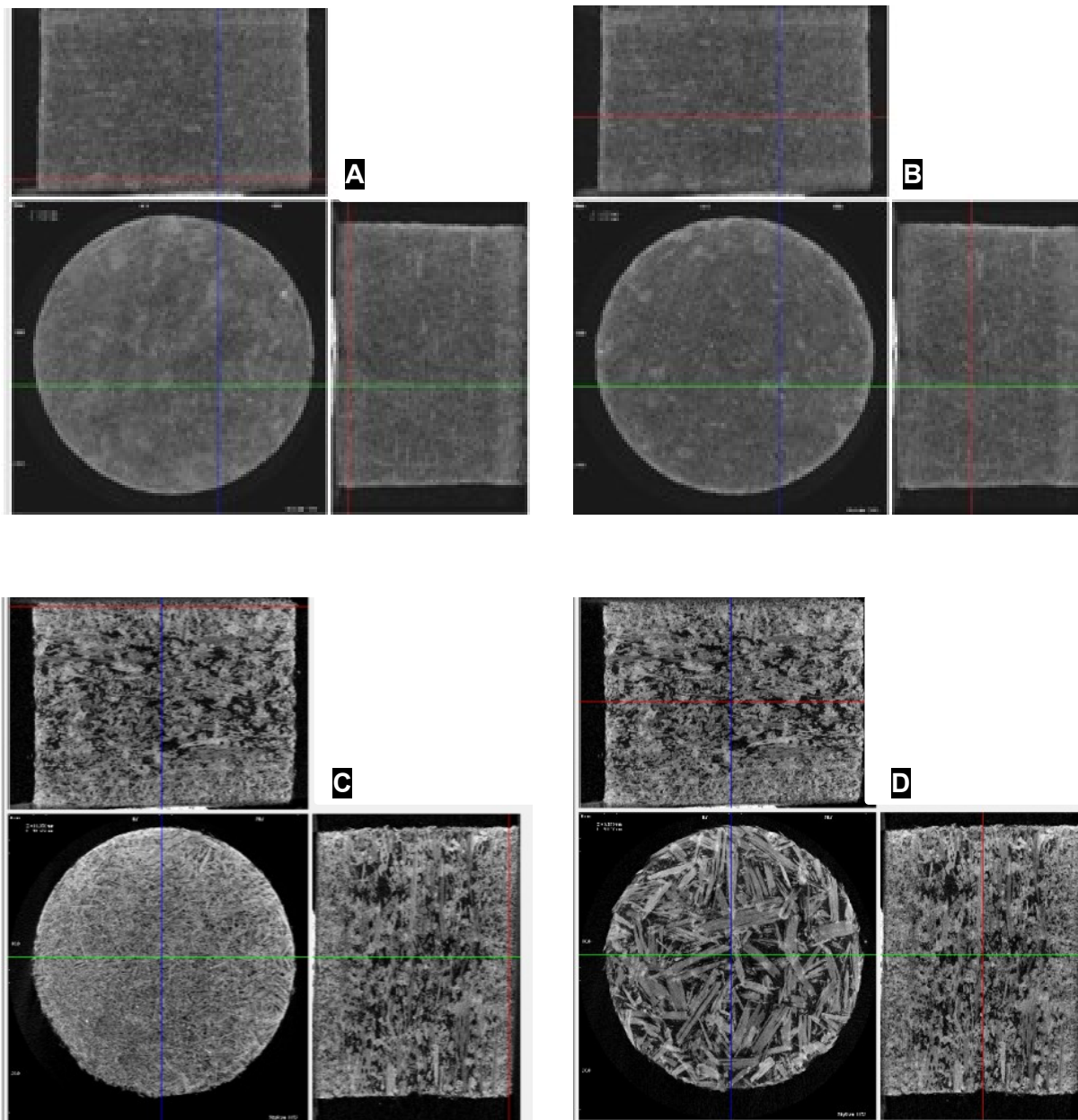


Figura 43 – Imagens de painéis MDF e MDP obtidas por microCT. (A) região superficial e (B) região central de painel MDF comercial; (C) camada externa e (D) camada interna de painel MDP comercial

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

*Com relação às fibras de eucalipto, partículas do bagaço de cana-de-açúcar e mistura entre ambas:*

- a utilização de partículas do colmo de cana-de-açúcar, na forma de bagaço, em mistura com as fibras de eucalipto, apresentou-se viável para a manufatura de painéis em conjunto com matriz fibrosa predominante de eucalipto;

- a classificação granulométrica das partículas de cana-de-açúcar, através de peneiras vibratórias, e a coleta de material que ultrapassou a peneira com abertura < 2,0 mm, permitiram a obtenção de material com morfologia apta à confecção de painéis em conjunto com matriz fibrosa predominante de eucalipto;

- a classificação visual das partículas de cana-de-açúcar e das fibras de eucalipto, bem como suas misturas, permitiu identificar aspectos morfológicos relevantes que remetem à aplicabilidade final dos novos produtos;

- a avaliação e caracterização dos elementos celulares dos colmos de cana-de-açúcar, da madeira de eucalipto e de sua mistura podem ser realizadas por técnica de microscopia eletrônica de varredura (MEV);

- a técnica NIR possibilitou a diferenciação das frações granulométricas das diferentes matérias primas.

*Com relação aos painéis confeccionados com diferentes porcentagens de fibras de eucalipto/partículas de bagaço de cana-de-açúcar:*

- painéis com até 25% de partículas de bagaço de cana-de-açúcar, em mistura com as fibras de eucalipto, são passíveis de confecção nas condições industriais atuais de obtenção de painéis MDF, com ligeiras adequações das condições de prensagem, para as condições desta pesquisa;

- os perfis densitométricos ao longo da espessura dos painéis, pela técnica de atenuação de raios X, evidenciam as variações da estrutura do painel, em diferentes níveis, em função do equipamento, do método de análise e da espessura do corpo de prova;

- os perfis de densidade dos painéis forneceram importantes informações de qualidade, aplicadas no ajuste das condições de prensagem e indicações do seu desempenho tecnológico;

- os perfis de densidade obtidos através do densitômetro Joyce Loebli podem ser analisados, comparativamente, com as imagens digitais de raios X, ampliando as possibilidades de diagnóstico dos parâmetros da matéria prima e dos processos de confecção dos painéis;

- os painéis produzidos na 1ª etapa das pesquisas (Etapa A) apresentaram ligeiro decréscimo em propriedades mecânicas a partir da utilização de um percentual de 50% de partículas de bagaço de cana-de-açúcar;

- os painéis produzidos na 2ª etapa das pesquisas (Etapa B), atendem as normas NBR 15316-2 (2006) para dosagem de resina em 16%;

- das dosagens de resina uréia formol avaliadas, a de 16% de resina mostrou-se com melhor desempenho para a manufatura de painéis e com diferenças significativas comparativamente à dosagem de 13%;

- o aumento percentual de utilização de partículas do bagaço de cana-de-açúcar na confecção dos painéis reduziu o teor de formol livre.

- o aumento percentual de utilização de partículas do bagaço de cana-de-açúcar na confecção dos painéis promoveu aumento expressivo do teor de sílica;

- os painéis confeccionados com percentuais entre 0 – 25% de partículas de bagaço de cana-de-açúcar, em faixas de 5%, não são resistentes e não apresentaram diferenças quanto ao ataque de fungos e cupins nos ensaios de durabilidade biológica.

- as imagens MEV permitiram visualizar detalhes anatômicos e morfológicos das regiões internas e superficiais dos painéis, sendo análise complementar aos perfis densitométricos;

- através das imagens MEV foi possível identificar a integridade da parede celular após os ensaios de resistência à tração perpendicular.

*Quanto a utilização de análises não destrutivas inovadoras para a caracterização tecnológica dos painéis:*

- a técnica ótica de deflectometria permitiu determinar valor de MOE similar às determinações clássicas conforme NBR 15316-3 (2006);

- a avaliação da estrutura interna dos painéis, através da microtomografia de raios X (microCT), permitiu verificar homogeneidade da matriz fibrosa, bem como disposição e diferenciação entre os elementos;

- a microCT permitiu identificar elementos internos aos painéis, como possíveis regiões de agrupamento de parênquima de cana-de-açúcar recobertos por adesivo, através de diferentes atenuações de raios X;

- para painéis com morfologia de partículas similares ao MDP a técnica microCT apresentou-se promissora e permitiu alta qualidade de imagens para caracterização interna e diferenciações entre as camadas externas (CE) e internas (CI);

- as análises por espectroscopia do infravermelho próximo (NIR) foram sensíveis a diferenciação dos percentuais de partículas de bagaço de cana-de-açúcar utilizados nos diferentes tratamentos propostos.



## 6 RECOMENDAÇÕES

- A técnica de deflectometria revelou-se promissora na caracterização do módulo de elasticidade de painéis, pois permite a sua determinação considerando o tamanho total da amostra, que no caso foi 370 x 370 mm, mas que pode ser maior e possivelmente até 1000 x 1000 mm. Assim, poderá ser uma técnica valiosa para, por exemplo, determinar o MOE em placas suspensas em mezaninos. Porém, face ao carácter experimental e inovador da aplicação desta técnica ótica, recomenda-se continuidade de pesquisas para melhor adaptação ao set up operacional do ensaio e utilização, como amostras, de outros painéis e compósitos bem como madeira maciça.

- O teor de sílica nos painéis confeccionados, crescentes em função da maior presença de partículas do bagaço de cana-de-açúcar na matriz fibrosa de eucalipto, podem refletir em maior desgaste de equipamentos de corte que, em caso extremo, possam dificultar a comercialização deste novo produto para alguns nichos específicos. Assim, recomendam-se novas avaliações com foco na verificação do desgaste de equipamentos ou mesmo no âmbito da aplicação de revestimento específico sobre estes equipamentos para aumento de sua vida útil.

- As muitas variáveis envolvidas na preparação e prensagem de painéis de fibra (MDF) e de partículas (MDP) apresentam diferentes especificações. Neste trabalho, visto a matriz fibrosa de eucalipto ser considerada como principal e obtida de desfibramento apto à confecção de painéis MDF, optou-se por adotar variáveis padrão para obtenção deste tipo de painel, até como foco de inovação e perspectiva de desenvolvimento de novo produto através da inserção de recurso fibrosos alternativo, no caso o bagaço de cana-de-açúcar. Assim, houve dificuldades na obtenção dos painéis com 100% de bagaço visto, notadamente, o mesmo apresentar uma morfologia de partículas mais próxima a de painéis MDP e que foi fruto do processo de esmagamento dos colmos e posterior classificação em peneiras.

Recomenda-se uma possível integração entre Universidades e Institutos de Pesquisas para aquisição de sistema de desfibramento em escala laboratorial, que atualmente é restrito (em escala industrial) a empresas privadas do setor, e que



poderia alavancar um grande leque de pesquisas com novos produtos e resíduos agropecuários e florestais, além dos diversos insumos envolvidos (novas resinas, emulsões, etc), pois seria possível a obtenção de material fibroso com morfologia idêntica à utilizada em um painel do tipo MDF, hoje o de maior crescimento nacional e internacional.

- Nas pesquisas desenvolvidas em continuidade recomenda-se a retirada das partículas retidas no coletor (ou finos) para a confecção dos painéis, devido sua a morfologia muito fina (maior consumo de resina) e presença de impurezas minerais (sílica), que resulta em possível maior desgaste dos equipamentos de corte.

- Houve tentativas de avaliação do perfil densitométricos, em equipamento GreCon, das amostras utilizadas nos bioensaios para possível inferência da dinâmica de ataque e regiões mais afetadas internamente ao painel, o que não foi possível devido a diferentes dimensões de corpos de prova e o equipamento ser operacional, apenas, com amostras de dimensões 50 x 50 mm.

- Como técnica complementar à microCT, recomendam-se análises com a utilização de radiação síncronon baseada em microtomografia de raios X (SR $\mu$ CT), para a avaliação interna dos elementos de compósitos de fibras em formato 3D.

## REFERÊNCIAS

AGUIAR, D.A.; RUDORFF, B.F.T.; SILVA, W.F.; CARVALHO, M.A.; GOLTZ, E.; AULICINO, T.L.; BRANDÃO, D.; ADAMI, M.; SUGAWARA, L.M.; MELO, M.P. **Monitoramento do modo de colheita da cana-de-açúcar no Estado de São Paulo**: ano safra 2009/2010. São José dos Campos: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2010. 154 p.

AISYAH, H.A.; PARIDAH, M.T.; SAHRI, M.H.; ANWAR, U.M.K. Properties of medium density fiberboard (MDF) from Kenaf (*Hibiscus cannabinus* L.) core as function of refining conditions. **Composites Part B**, Amsterdam, 2012. In press.

AKGÜL, M.; ÇAMLIBEL, O. Manufacture of medium density fiberboard (MDF) panels from rhododendron (*R. ponticum* L.) biomass. **Building and Environment**, Amsterdam, v. 43, n. 4, p. 438–443, 2008.

AMUSANT, N.; ARNOULD, O.; PIZZI, A.; DEPRES, A.; MANSOURIS, R.H.; BARDET, S.; BAUDASSÉ, C. Biological properties of an OSB eco-product manufactured from a mixture of durable and non durable species and natural resins. **European Journal of Wood and Wood Products**, Berlin, v. 67, p. 439–447, 2009.

ASHORI, A.; NOURBAKHS, A. Effect of press cycle time and resin content on physical and mechanical properties of particleboard panels made from the underutilized low-quality raw materials. Iranian Research Organization for Science and Technology (IROST), Iran. **Industrial Crops and Products**, Amsterdam, v. 28, n. 2, p. 225–230, 2008.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DE PAINÉIS DE MADEIRA. Cenário da indústria de painéis. In: ENCONTRO DA CADEIA PRODUTIVA DE PAINÉIS E MÓVEIS. **Anais...** Bento Gonçalves: ABIPA, 2008. 1 CD-ROM.

\_\_\_\_\_. **Números**. Disponível em: <<http://www.abipa.org.br/numeros.php>>. Acesso em: 28 out. 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14810**: chapa de madeira aglomerada. Pt. 1: Terminologia. Rio de Janeiro, 2002a. 5 p.

\_\_\_\_\_. **NBR 14810**: chapa de madeira aglomerada. Pt. 2: Requisitos. Rio de Janeiro, 2002b. 4 p.

\_\_\_\_\_. **NBR 14810**: chapa de madeira aglomerada. Pt. 3: Métodos de ensaio. Rio de Janeiro, 2002c. 27 p.

\_\_\_\_\_. **NBR 15316**: painéis de fibra de média densidade. Pt. 1: Terminologia. Rio de Janeiro, 2006a. 4 p.

\_\_\_\_\_. **NBR 15316**: painéis de fibra de média densidade. Pt. 2: Requisitos. Rio de Janeiro, 2006b. 4 p.

\_\_\_\_\_. **NBR 15316**: painéis de fibra de média densidade. Pt. 3: Métodos de ensaio. Rio de Janeiro, 2006c. 48 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE PRODUTORES DE FLORESTAS PLANTADAS. **Anuário estatístico da ABRAF**: ano base 2009. Brasília, 2010. 140 p.

ASSOCIATION FRANÇAISE DE NORMALISATION. **EVN 12038**: panneaux à base de bois; méthode d'essai pour déterminer la résistance aux champignons basidiomycètes lignivores. Bruxelles, 2003. 30 p.

\_\_\_\_\_. **EN117**: détermination du seuil d'efficacité contre lês espèces reticulitermes. Bruxelles, 2005. 19 p.

ATCHISON, J.E.; LENGEL, D.E. Rapid growth in the use of bagasse as a raw material for reconstituted panelboard. In: PARTICLEBOARD/COMPOSITE MATERIALS SYMPOSIUM, 9., 1985. **Proceedings...** Washington: Washington State University, 1985. p. 145–193.

ATHANASSIADOU, E.; RAFFAEL, E.; MANTANIS, G. Medium density fibreboards (MDF) from recycled fibres. In: CONFERENCE TOWARDS A HIGHER TECHNICAL, ECONOMICAL AND ENVIRONMENTAL STANDARD, 2., 2005, Bordeaux. **Proceedings...** Bordeaux: CTBA, 2005. p. 248-261.

AYRILMIS, N. Effect of panel density on dimensional stability of medium and high density fiberboards. **Journal of Materials Science**, London, v. 42, p. 8551–8557, 2007.

BANCO NACIONAL DE DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO E SOCIAL. Área de Operações Industriais. Gerência Setorial de Agroindústria. **Setor sucroalcooleiro**: álcool. Brasília, 1995. 5 p.

\_\_\_\_\_. Área de Setores Produtivos 1. **Painéis de madeira reconstituída**. Brasília, 2002. 22 p.

BEALL, F.C. Industrial applications and opportunities for nondestructive evaluation of structural wood members. **Maderas: Ciencia y Tecnología**, Concepción, v. 9, n. 2, p. 127-134, 2007.

BEKHTA, P.; NIEMZ, P. Effect of relative humidity on some physical and mechanical properties of different types of fibreboard. **European Journal of Wood and Wood Products**, Berlin, v. 67, p. 339–342, 2009.

BELINI, U.L. **Caracterização e alterações na estrutura anatômica da madeira do *Eucalyptus grandis* em três condições de desfibramento e efeito nas propriedades tecnológicas de painéis MDF**. 2007. 90 p. Dissertação (Mestrado em Tecnologia de Produtos Florestais) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2007.

BELINI, U.L.; TOMAZELLO FILHO, M. Avaliações tecnológicas de painéis MDF de madeira de *Eucalyptus grandis* confeccionados em laboratório e em linha de produção industrial. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 20, n. 3, p. 495-502, 2010.

BELINI, U.L.; TOMAZELLO FILHO, M.; CHAGAS, M.P. Densitometria de raios X aplicada na avaliação tecnológica de painéis MDF de eucalipto. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 37, n. 84, p. 343-350, dez. 2009.

BELINI, U.L.; TOMAZELLO FILHO, M.; OLIVEIRA, J.T.S.; CHAGAS, M.P. Alterações na estrutura anatômica da madeira de cavacos de *Eucalyptus grandis* em três condições de desfibramento para a confecção de painéis MDF. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 32, p. 523-532, 2008.

BELINI, U.L.; HEIN, P.R.G.; TOMAZELLO FILHO, M.; RODRIGUES, J.C.; CHAIX, G. Near infrared spectroscopy for estimating sugarcane bagasse content in medium density fiberboard. **BioResources**, Raleigh, v. 6, n. 2, p. 1816 -1829, 2011a.

BELINI, U.L.; TOMAZELLO FILHO, M.; CASTRO, V.R.; MUNIZ, G.I.B.; LASSO, P.R.O.; VAZ, C.M.P. Microtomografia de raios X (microCT) aplicada na caracterização anatômica da madeira de folhosa e de conífera. **Floresta e Ambiente**, Rio de Janeiro, v. 18, n. 1, p. 30-36, 2011b.

BENADUCE, C. **Fabricação de painéis de média densidade (MDF) a partir de fibras de *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden e *Pinus caribaea* Morelet var. *hondurensis* Barret e Golfari.** 1998. 113 p. Dissertação (Mestrado em Ciências e Tecnologia de Madeiras) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1998.

BIOLCHI, M. **RS concede incentivos fiscais para usina de etanol.** 2010.

Disponível em:

<<http://www.marciobiolchi.com.br/web/index.php?menu=news&id=102>>. Acesso em: 12 ago. 2011.

BORGES, J.C. **Tecnologia de resinas e painéis de madeira:** passado, presente e futuro. Curitiba: Chimar Hellas S.A., 2008. 37 p.

BRASIL. Ministério das Minas e Energia. **Plano Nacional de Energia 2030.** Rio de Janeiro, 2007. 408 p.

BRITO, J.O. **Química da madeira:** apontamentos da disciplina LSV – Química da Madeira. 3. ed. Piracicaba: ESALQ, 1983. 126 p.

BRITO, J.O.; BARRICHELO, L.E.G. Correlações entre características físicas e químicas da madeira e a produção de carvão vegetal: I. Densidade e teor de lignina da madeira de eucalipto. **IPEF**, Piracicaba, n. 14, p. 9-20, 1977.

BUAINAIN, A.M.; BATALHA, A.M. (Coord.). **Cadeia produtiva de madeira.** Brasília: IICA; MAPA, Secretaria de Política Agrícola, 2007. 84 p.

BUCUR, V. **Nondestructive characterization and imaging of wood**. Berlin: Springer, 2003a. 354 p.

\_\_\_\_\_. Techniques for high resolution imaging of wood structure: a review. **Measurement Science and Technology**, Bristol, v. 14, p. 91-98, 2003b.

BUYUKSARI, U.; AYRILMIS, N.; AVCI, E.; KOC, E. Evaluation of the physical, mechanical properties and formaldehyde emission of particleboard manufactured from waste stone pine (*Pinus pinea* L.) cones. **Bioresources Technology**. Fayetteville, v. 101, p. 255 -259, 2010.

CAI, Z.; MUEHL, J. H.; WINANDY, J. Effects of press schedule on formation of vertical density profile for MDF panels. In: INTERNATIONAL WOOD COMPOSITES SYMPOSIUM. **Proceedings...** Seattle: Washington State University, 2006. 11 p.

CALLISTER, J.R.; WILLIAN, D. **Materials science and engineering: an introduction**. 4<sup>th</sup> ed. New York: Wiley, 2000. p. 510-544.

CAMPOS, A.C.M.; HEIN, P.R.G.; MENDES, R.F.; MENDES, L.M.; CHAIX, G. Near infrared spectroscopy to evaluate composition of agro-based particleboards. **BioResources**, Raleigh, v. 4, n. 3, p. 1058-1069, 2009.

CARASCHI, J.C.; LEÃO, A.L.; CHAMMA, P.V.C. Avaliação de painéis produzidos a partir de resíduos sólidos para aplicação na arquitetura. **Polímeros: Ciência e Tecnologia**, São Carlos, v. 19, n. 1, p. 47-53, 2009.

CARNEIRO, A.C.O.; VITAL, B.R.; PEREIRA, F.A. Adesivos e sua importância na indústria madeireira. In: OLIVEIRA, J.T.S.; FIEDLER, N.S.; NOGUEIRA, M. (Org.). **Tecnologias aplicadas ao setor madeireiro II**. Vitória: UFES, 2007, cap. 4, p. 99 - 128.

CENTRO DE TECNOLOGIA CANAVIEIRA. **Bagaço e palha de cana para fins energéticos**. Disponível em: <<http://www.ctcanavieira.com.br>>. Acesso em: 11 ago. 2011.

CHAPMAN, K.M.; JORDAN, P.J. Optimising blowline resin blending in MDF manufacture. In: CPA PRESSLINE SEMINAR, 2002, Charlotte. **Proceedings...** Charlotte, 2002.

CHEN, C.M.; HSU, L.C-Y. Effects of treatment methods on relative reactivity of biomass extracts toward formaldehyde. **Forest Products Journal**, Madison, v. 52, n. 2, p. 92-99, Feb. 2002.

CHEN, S.; LIU, X.; FANG, L.; WELLWOOD, R. Digital X-ray analysis of density distribution characteristics of wood-based panels. **Wood Science and Technology**, Berlin, v. 44, n. 1, p. 85-93, May 2009.

CHUNG, W.Y.; WI, S.G.; BAE, H.J.; PARK, B.D. Microscopic observation of wood-based composites exposed to fungal deterioration. **Journal of Wood Science**. Tokyo, v. 45, n. 1, p. 64-68, 1999.

COLLET, B.M. Scanning electron microscopy: a review and report of research in wood science. **Wood and Fiber**, Lawrence, v. 2, n. 2, p. 113-133, 1970.

COPERSUCAR. **Cana-de-açúcar**. Disponível em:  
<[http://www.copersucar.com.br/institucional/por/academia/cana\\_açúcar.asp](http://www.copersucar.com.br/institucional/por/academia/cana_açúcar.asp)>.  
Acesso em: 12 fev. 2009.

CURLING, S.F.; MURPHY, R.J. The effect of artificial ageing on the durability of wood-based board materials against basidiomycete decay fungi. **Wood Science and Technology**, Berlin, v. 33, p. 245 – 257, 1999.

\_\_\_\_\_. The use of the Decay Susceptibility Index (DSI) in the evaluation of biological durability tests of wood based board materials. **Holz als Roh- und Werkstoff**, Heidelberg, v. 60, p. 224–226, 2002.

DURATEX S.A. Brazilian MDF market evolution. In: INTERNATIONAL WOOD COMPOSITES SYMPOSIUM AND TECHNICAL WORKSHOP, 42., 2008, Seattle. **Proceedings...** Seattle: Duratex S.A., 2008.

ECKELMAN, C.A.; CASSENS, D.L. Withdrawal strength of dowels from wood composites. **Forest Products Journal**, Madison, v. 35, n. 5, p. 55-60, May 1985.

ECOWOOD DO BRASIL. **Produção de Painel Industrial AFB (Agricultural Fiber Board) com bagaço de cana**. Disponível em:  
<[http://www.nucleoestudo.ufla.br/necana/pdfs/aproveitamento\\_de\\_bagaco.pdf](http://www.nucleoestudo.ufla.br/necana/pdfs/aproveitamento_de_bagaco.pdf)>.  
Acesso em: 30 set. 2009.

ELEOTÉRIO, J.R. **Propriedades físicas e mecânicas de painéis MDF de diferentes densidades e teores de resina**. 2000. 117 p. Tese (Mestrado em Ciência e Tecnologia de Madeiras) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2000.

ENGSTRÖM, B. Real time determination of formaldehyde emission from particleboards using NIR-Spectroscopy. In: INTERNATIONAL PANEL PRODUCTS SYMPOSIUM, 2008, Espoo. **Proceedings...** Espoo, 2008. p. 18-25.

ERIKSSON, K.E.L.; BLANCHETTE, R.A.; ANDER, P. **Microbial and enzymatic degradation of wood and wood components**. New York: Springer – Verlag, 1990. 407 p.

EUROPEAN STANDARD. **EN 311**: wood-based panels – surface soundness – test method. Bruxelas, 1997. 7 p.

EUROPEAN STANDARD. **EN 320**: fibreboards – determination of resistance to axial withdrawal of screws. Bruxelas, 1997. 5 p.

EUROPEAN STANDARD. **EN 622-1**: fibreboards – specifications. Part 1: General requirements. Bruxelas, 2003. 9 p.

FAO. **FAO advisory Committee on paper and wood products**. Rotorua, 2000. 32 p .

FEENEY, F.E.; LAWLOR, V.; EVERTSEN, J.A. An ultrasonic analogue to gamma ray densitometry of medium density fibreboard (MDF). In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON NONDESTRUCTIVE TESTING OF WOOD, 10., 1996, Lausanne. **Proceedings...** Lausanne, 1996. p. 407.

FERRAZ, A.L. Fungos decompositores de materiais lignocelulósicos. In: ESPOSITO, E.; AZEVEDO, J.L. (Ed.). **Fungos: uma introdução a biologia, bioquímica e biotecnologia**. Caxias do Sul. EDUSC, 2004.

FERREIRA, J.; BEZERRA, I.M.T.; NEVES, G.A. FERREIRA, H.C.; CARVALHO, J.B.Q. Avaliação de argamassa com cinzas de casca de arroz. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CERÂMICA, **Anais...** Salvador, 2007.

FERREIRA-LEITÃO, V.; GOTTSCHALK, L.M.F.; FERRARA, M.A.; NEPOMUCENO, A.L.; MOLINARI, H.B.C.; BON, E.P.S. Biomass residues in brazil: availability and potential uses. **Waste and Biomass Valorization**, Dordrecht, v. 1, p. 65-76, 2010.

FUJIMOTO, T.; KURATA, Y.; MATSUMOTO K.; TSUSHIKAWA, S. Application of near infrared spectroscopy for estimating wood mechanical properties of small clear and full length lumber specimens, **Journal of Near Infrared Spectroscopy**, Chichester, v. 16, p. 529-537, 2008.

GALLETI, S.R. Introdução a microscopia eletrônica. **Biológico**, São Paulo, v. 65, n. 1/2, p. 33-35, 2003.

GARCIA, C.H. **Tabelas para classificação do coeficiente de variação**. Piracicaba: IPEF, 1989. 10 p. (Circular Técnica, 171).

GOMES, E.O. Caracterização do bagaço da cana-de-açúcar. In: CONGRESSO INTERNACIONAL GERAÇÃO DISTRIBUÍDA E ENERGIA NO MEIO RURAL, 6., 2006, Campinas. **Anais...** Campinas: UNICAMP, 2006.

GORINI, A.P.F. **Panorama do setor moveleiro no Brasil, com ênfase na competitividade externa a partir do desenvolvimento da cadeia industrial de produtos sólidos de madeira**. Rio de Janeiro: BNDES, 1998. 50 p.

GRACE, J.K. Susceptibility of compressed bagasse fiber to termite attack. **Forest Products Journal**, Madison, v. 46, n. 9, p. 76-78, Sept. 1996.

GRECON. **Stenograph**. Disponível em: <[http://www.grecon.de/files/pdfs/products/gesamt\\_ci2\\_pt.pdf](http://www.grecon.de/files/pdfs/products/gesamt_ci2_pt.pdf)>. Acesso em: 15 set. 2011.

GRIGORIOU, A.; PASSIALIS, C.; VOULGARIDIS, E. Kenaf core and bast fiber chip as raw material in production on one-layer experimental particleboard. **Holz als Roh – und Werkstoff**, Heidelberg, v. 58, p. 290 - 291, 2000.

HALVARSSON, S.; EDLUND, H.; NORGEN, M. How to produce high performance straw MDF. In: INTERNATIONAL PANEL PRODUCTS SYMPOSIUM, 2008, Espoo. **Proceedings...** Espoo, 2008. p. 189–200.

HAYGREEN, J.G.; BOWYER, J.L. **Forest products and wood science: an introduction**. Ames: Iowa State University, 1982. 459 p.

HEIN, P.R.G.; CAMPOS, A.C.M.; MENDES, R.F.; MENDES, L.M.; CHAIX, G. Evaluation of bio-based particleboards properties by near infrared spectroscopy. **Holz als Roh- und Werkstoff**, Berlin, v. 68, n. 4, 2011.

HESCH, R. Manufacture of particleboard from bagasse – a fully integrated production plant. **Board Manufacture**, Dorchester, v. 10, n. 42, p. 39-45, 1967

HOAG, M. Surface testing of particleboard and medium density fiberboard for laminating applications. **Tappi Journal**, Atlanta, v. 75, n.10, p. 116-121, Oct 1992.

HOAREAU, W.; OLIVEIRA, F.B; GRELIER, S.; SIEGMUND, B.; FROLLINI, E. CASTELAN, A. Fiberboards based sugarcane bagasse lignin and fibers. **Macromolecular Materials and Engineering**, Weinheim, v. 291, p. 829–839. 2006.

HORWATH, E.; HUTTER, T.; KESSLER, R.; WIMMER, R. Feedback and feedforward control of wet-processed hardboard production using spectroscopy and chemometric modeling. **Analytica Chimica Acta**, New York, v. 544, p. 47–59, 2005.

HUBBE, M. A. The implementation of findings published in scholarly articles. **BioResources**, Raleigh, v. 5, n. 4, p. 2024-2025, 2010.

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS. **Madeiras: material para o design**. São Paulo, 1997. 71 p.

\_\_\_\_\_. **Madeira: uso sustentável na construção civil**. 2. ed. São Paulo, 2009. 99 p.

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS. **CANASAT: mapeamento da cana via imagens de satélites de observação da terra**. Disponível em: <<http://www.dsr.inpe.br/mapdsr/frame.jsp>>. Acesso em: 12 fev. 2009.

IWAKIRI, S.; KEINERT JUNIOR, S.; ALBUQUERQUE, C.E.C.; LATORRACA, J.V.F.; MENDES, L.M. **Painéis de madeira reconstituída**. Curitiba: FUPEF, 2005. 247 p.

IRLE, M.; BELLONCLE, C.; GUEZGUEZ, B. Free formaldehyde - Where can I find It ? In: INTERNATIONAL PANEL PRODUCTS SYMPOSIUM, 2008, Espoo. **Proceedings...** Espoo, 2008. p. 31 - 38.

JORNAL DO COMMERCIO. Banana e pupunha tomam o lugar da madeira de lei. Rio de Janeiro, 23 fev. 2007.

KARTAL, S.N.; GREEN, F. Decay and termite resistance of medium density fiberboard (MDF) made from different wood species. **International Biodeterioration & Biodegradation**, Barking, v. 51, p. 29-35, 2003.



KELLEY, S.S.; ELDER, T.; GROOM, L.H. Changes in the chemical composition and spectroscopy of loblolly pine medium density fiberboard furnish as a function of age and refining pressure. **Wood Fiber Science**, Lawrence, v. 37, p. 14-22, 2005.

KELLY, M.W. **A critical literature review of relation particles between processing parameters and physical properties of particleboard**. Madison: US Forest Products Laboratory, 1977. 66 p.

KHALIL, A.H.P.S.; FAZITA, M.R.; BHAT, A.H.; JAWAID, M.; FUAD, N.A. Development and material properties of new hybrid plywood from oil palm biomass. **Materials and Design**, Reigate, v. 31, p. 417–424, 2010.

KIM, J.H. **Identification de cartes d'endommagement de plaques composites impactées par la méthode des champs virtuels**. 2008. 208 p. (École doctorale) - L'École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers, Châlons-en-Champagne, 2008.

KIM, J.H.; PIERRON, F.; GREDIAC, M.; WISNOM, M.R. A procedure for producing reflective coatings on plates to be used for full field slope measurements by a deflectometry technique. **Strain**, Oxford, v. 43, n. 2, p. 138–144, 2007.

KITAJIMA, E.W.; LEITE, B. **Curso introdutório de microscopia eletrônica de varredura**. Piracicaba: ESALQ, Núcleo de Apoio à Pesquisa em Microscopia Eletrônica, 1999. 46 p.

KLOCK, U.; MUNIZ, G.I.B; HERNANDEZ, J.A.; ANDRADE, A.S. **Química da madeira**. Curitiba: Universidade Federal do Paraná, 2005. 86 p.

KOLLMANN, F.F.P.; KUENZI, E.W.; STAMM, A.J. **Principles of wood science and technology**. Berlin: Springer – Verlag, 1975. v. 2: Wood based materials, 703 p.

KRZYSIK, A.M.; YOUNGQUIST, J.A.; MUEHL, J.H.; FRANCA, F.E. Medium density fiberboards from plantation grown *Eucalyptus saligna*. **Forest Products Journal**, Madison, v. 51, n. 10, p. 47-50, Oct. 2001.

KUBLER, H. **Wood: as building and hobby material**. New York: John Wiley, 1980. 256 p.

LAHR, F.A.R. (Org.). **Produtos derivados da madeira**. São Carlos: USP, EESC, SET, LAMEM, 2008. 161 p.

LAHR, F.A.R.; CAMPOS, C.I. Estudo comparativo dos resultados de ensaio de tração perpendicular para MDF produzido em laboratório com fibras de Pinus e Eucalipto utilizando uréia formaldeído. **Revista Matéria**, Rio de Janeiro, v. 9, n.1, p. 32–42, 2004.

LEE, S.; SHUPE, T.F.; HSE, C.Y. Utilization of Chinese tallow tree and bagasse for medium density fiberboard. **Forest Products Journal**, Madison, v. 54, n. 12, p. 71-76, 2004.

\_\_\_\_\_. Mechanical and physical properties of agro based fiberboard. **Holz als Roh – und Werkstoff**, Heidelberg, v. 64, p. 74-79, 2006.

LIMA, A.M.; VIDAURRE, G.B.; LIMA, R.M.; BRITO, E.O. Utilização de fibras (epicarpo) de babaçu como matéria prima alternativa na produção de painéis de madeira aglomerada. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 30, n. 4, p. 645-650, 2006.

LOUZADA, J.L.P.C. **Variação fenotípica de genética em características estruturais na madeira de *Pinus pinaster* Ait.** Vila Real: Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro, 2000. 293 p. (Série Didática. Ciências Aplicadas, 143).

LUX, J.; DELISÉE, C.; THIBAUT, X. 3D characterization of wood based fibrous materials: an application. **Image Analysis & Stereology**, Ljubljana, v. 25, p. 25-35, 2006.

LUZ, S.M.; GONÇALVES, A.R.; DEL'ARCO JR., A.P. Mechanical behavior and microstructural analysis of sugarcane bagasse fibers reinforced polypropylene composites. **Composites: Part A**, Amsterdam, v. 38, p. 1455-1461, 2007.

MALONEY, T.M. **Modern particleboard & dry process fiberboard manufacturing.** San Francisco: Miller Freeman, 1989. 672 p.

MANHÃES, A.P. **Caracterização da cadeia produtiva do bambu no Brasil abordagem preliminar.** Seropédica: Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Instituto de Florestas, 2008. 39 p.

MANTANIS, G.; ATHANASSIADOU, E.; NAKOS, P.; COUTINHO, A. A new process for recycling waste fiberboards. In: INTERNATIONAL WOOD COMPOSITES SYMPOSIUM, 2004, Pullman. **Proceedings...** Pullman: Washington State University, 2004. p. 119-122.

MARKESSINI, C.; ATHANASSIADOU, E.; TSIANTZI, S. Producing panels with formaldehyde emission at wood level. In: EUROPEAN WOOD BASED SYMPOSIUM, 2010, Hannover. **Proceedings...** Hannover, 2010.

MASISA. Tendência do setor de painéis de madeira no MS. In: CONGRESSO FLORESTAL DO MATO GROSSO DO SUL, 2010, Campo Grande. **Anais...** Campo Grande, 2010. 1 CD-ROM.

MATO GROSSO. Secretaria de Estado da Fazenda. **LEI Nº 7.200, de 09 de dezembro de 1999. Programa de Desenvolvimento do Agronegócio da Madeira – PROMADEIRA.** Disponível em:  
<<http://app1.sefaz.mt.gov.br/sistema/legislacao/legislacaotribut.nsf/07fa81bed2760c6b84256710004d3940/3946b13694c8bd0b042568a9007759c0?OpenDocument>>.  
Acesso em: 13 dez. 2010.

MATOSKI, A.; IWAKIRI, S. Avaliação de propriedades físico mecânicas de painéis de cimento-madeira utilizando farinha de madeira com granulometria controlada. **Revista Floresta**, Curitiba, v. 37, n. 2, p. 149-158, 2007.

MAYO, S.; CHEN, F.; EVANS, R. Micron-scale 3D imaging of wood and plant microstructure using high-resolution X-ray phase-contrast microtomography. **Journal of Structural Biology**, Orlando, v. 171, n. 2, p. 182–188, 2010.

MENDES, R.F.; MENDES, L.M.; ABRANCHES, R.A.S.; SANTOS, R.C.; GUIMARÃES JR., J.B. Painéis aglomerados produzidos com bagaço de cana em associação com madeira de eucalipto. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 38, n. 86, p. 285-295, jun. 2010.

MOIZÉIS, F.A. **Painéis de bambu, uso e aplicações**: uma experiência didática nos cursos de Design em Bauru, São Paulo. 2007. 113 p. Dissertação (Mestrado em Desenho Industrial) - Faculdade de Arquitetura, Artes, Comunicação, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Bauru, 2007.

MORA, C.R.; SCHIMLECK, L.R.; ISIK, F. Near infrared calibration models for the estimation of wood density in *Pinus taeda* using repeated sample measurements. **Journal of Near Infrared Spectroscopy**, Chichester, v. 16, p. 517-528, 2008.

MOARCAS, O.; IRLE, M. Internal bond, MOE, MOR and density profiles of C4M 18 mm thick particleboards. In: EUROPEAN PANEL PRODUCTS SYMPOSIUM, 1., 1997, Llandudno. **Proceedings...** Llandudno, 1997.

MULLEN, J.D. Formaldehyde-free adhesive system provides a cost-competitive, environmentally-friendly alternative for interior wood products market. In: INTERNATIONAL PANEL PRODUCTS SYMPOSIUM, 2008, Espoo. **Proceedings...** Espoo, 2008. p. 117-120.

MULLER, G.; SCHOPPER, C.; VOS, H.; KHARAZIPOUR, A.; POLLE, A. FTIR-ATR spectroscopy analyses of changes in wood properties during particle- and fiberboard production of hard- and softwood trees. **BioResources**, Raleigh, v. 4, n. 1, p. 49-71, 2009.

NIKVASH, N.; KRAFT, R.; KHARAZIPOUR, A.; EURING, M. Comparative properties of bagasse, canola and hemp particle boards. **European Journal of Wood and Wood Products**, Berlin, v. 68, p. 323–327, 2010.

OKINO, E.Y.A.; ALVES, M.V.S.; TEIXEIRA, D.E.; SOUZA, M.R.; SANTANA, M.A.E.; MENEZZI, C.H.S. Ensaio acelerado de laboratório de chapas OSB de seringueira submetidas ao ataque de fungos apodrecedores. **Revista Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 19, n. 3, p. 333-341, 2009.

OLIVEIRA, J.M. **Serviço Brasileiro de Respostas Técnicas**. SENAI – RS, Centro Nacional de Tecnologias Limpas, 2006. 3 p. Disponível em: <<http://sbrtv1.ibict.br/upload/sbrt4031.pdf?PHPSESSID=55ffa74ec891d4dd73f83cdc7e6b1dd5>>. Acesso em: 22 jan. 2009.

OLIVEIRA, J.T.S.; FIEDLER, N.S.; NOGUEIRA, M. (Org.). **Tecnologias aplicadas ao setor moveleiro**. Jerônimo Monteiro: UFES, 2007. 420 p.

ORTUNO, T.G.; RODRIGUES, J.A.; GARCÍA, M.T.F.; VILLENA, M.F.; GARCÍA, C.E.F. Evaluation of the physical end mechanical properties of particleboard made from giant reed (*Arundo donax* L.). **BioResources**, Raleigh, v. 6, n. 1, p. 477-486, 2011.

PAIVA, J.M.F.; FROLLINI, E. Sugarcane bagasse reinforced phenolic and lignophenolic composites. **Journal of Applied Polymer Science**, New York, v. 83, n. 4, p. 880-888, 2002.

PAIVA, J.M.F.; TRINDADE, W.G.; FROLLINI, E. Sugar cane bagasse fiber as reinforcement in phenolic-matrix composites. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON NATURAL POLYMERS AND COMPOSITES, 2., 1998, Atibaia. **Proceedings...** Atibaia: Ed. L.H.C., 1998. p. 143-148.

PAKDEL, H.; CYR, P.L.; RIEDL, B.; DENG, J. Quantification of urea formaldehyde resin in wood fibers using X-ray photoelectron spectroscopy and confocal laser scanning microscopy. **Wood Science and Technology**, Berlin, v. 42, p. 133-148, 2008.

PAPADOPOULOS, A.N.; HILL, C.A.S.; GKARAVELI, A.; NTALOS, G.A.; KARASTERGIOU, S.P. Bamboo chips (*Bambusa vulgaris*) as an alternative lignocellulosic raw material for particleboard manufacture. **Holz als Roh – und Werkstoff**, Heidelberg, v. 62, p. 36-39, 2004.

PASQUINI, C. Near infrared spectroscopy: practical aspects and analytical applications. **Journal of the Brazilian Chemical Society**, Campinas, v. 14, n. 2, p. 198-219, 2003.

PATURAU, J.M. **By-products of the cane sugar industry**. 3<sup>rd</sup> ed. Amsterdam: Elsevier, 1989. 275 p.

PEIXOTO, G.L.; BRITO, E.O. Avaliação da granulometria de partículas de *Pinus taeda* combinadas com adesivos comerciais para a fabricação de aglomerado. **Floresta e Ambiente**, Rio de Janeiro, v. 7, n. 1, p. 60-67, 2000.

PEREIRA, H.; PARDOS, J.; BOUDET, A.M.; MITCHELL, P.; MUGHINI, G.; KYRITSIS, S.; DALIANIS, C. Eucalypt plantation for production of raw material for industry and energy in Europe. In: BIOMASS FOR ENERGY AND THE ENVIRONMENT, 199, Copenhagen. **Proceedings...** Copenhagen: Ed. Pergamon, 1996. p. 84-89.

PEREIRA, S.F. **Porosidade do solo avaliada pela análise de imagens com os softwares NOESIS Visilog, CTAn, Image J, Scion Image e Imago**. 2009. 81 p. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Faculdade de Ciências Agronômicas, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Botucatu, 2009.

PIZZI, A. **Advanced wood adhesives technology**. New York: Marcel Dekker, 1994. 289 p.

PIZZI, A.; MITTAL, K.L. **Handbook of adhesive technology**. 2<sup>nd</sup> ed. New York: M. Dekker, 2003. 720 p.

PLASTER, O.B.; OLIVEIRA, J.T.S.; PEREIRA, A.; BRAZ, R.C.L. Comportamento de juntas coladas da madeira serrada de *Eucalyptus sp.* **Cerne**, Lavras, v. 14, n. 3, p. 251-258, jul./set. 2008.

P-LINE: **Produção de painéis a partir de composto plástico madeira**. Pallmann. Disponível em: <[http://www.pallmann.com.br/wood\\_plastic/pdf/ProdPaineisWPC.pdf](http://www.pallmann.com.br/wood_plastic/pdf/ProdPaineisWPC.pdf)>. Acesso em: 05 out. 2009.

PRANDA, J. Medium density fiberboards made from *Pinus pinaster* and *Eucalyptus globulus* wood. Part I: Chemical composition and specific surface area of defibrated wood. **Drevarsky Vyskum**, Bratislava, n. 2, p. 19–28, 1995.

RENÓFIO, A.; FERREIRA, C.V. **Confecção de painéis de serragem cromada com resina fenólica**. Bauru: UNESP, 2001. 46 p.

REZENDE, J.L.P.; COELHO JR., L.M.; BORGES, L.A.C. Madeira e derivados: oportunidades dos Brasil no mercado internacional. In: OLIVEIRA, J.T.S.; FIEDLER, N.S.; NOGUEIRA, M. (Org.). **Tecnologias aplicadas ao setor madeireiro III**. Jerônimo Monteiro: UFES, 2008, cap. 1, p. 11-42.

RIALS, T.G.; KELLEY, S.S. Use of spectroscopic techniques for predicting the mechanical properties of wood composites. **Wood and Fiber Science**, Lawrence, v. 34, p. 398-407, 2002.

RIALS, T.G.; KELLEY, S.S.; SO, C.L.; GROOM, L.H. Characterization of wood composites by near infrared spectroscopy. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON NONDESTRUCTIVE TESTING OF WOOD, 13., 2003. **Proceedings...** Califórnia:, F.C. Beall, 2003. p. 113-116.

RODARMEL, J.L. **Medium density fiberboard refining: better fibers**. Muncy: Andritz Sprout-Bauer, 1995. 8 p.

RODRIGUES, J.C.C. **Aplicação e desenvolvimento de métodos expeditos por espectroscopia de infravermelho próximo e análise multi variada: aplicações agroflorestais**. Lisboa: IICT, Centro de Florestas e Produtos Florestais, 2007. 27 p.

ROFFAEL, E.; SCHNEIDER, T. **Advances in paraffin sizing**. Goettingen: University of Goettingen, Institute for Wood Biology and Wood Technology, [19--]. 8 p.

ROMERO, T. **Bagaço na construção civil. Agência FAPESP**. 29.05.2007. Disponível em: <<http://www.agencia.fapesp.br/materia/7211/noticias/bagaco-na-construcao-civil.htm>>. Acesso em: 21 nov. 2009.

ROSA, S.E.S.; CORREA, A.R.; LEMOS, M.L.F.; BARROSO, D.V. O setor de móveis na atualidade: uma análise preliminar. **BNDES Setorial**, Rio de Janeiro, n. 25, p. 65-106, 2007.

ROSSEL, C.E.V. **O setor sucroalcooleiro e a produção de etanol: transformações após o Protocolo de Kioto.** Campinas: Grupo Energia - Projeto Etanol; MCT, NIPE; UNICAMP, 2006. 18 p.

ROWEL, R.M.; KEANY, F.M. Fiberboards made from acetylated bagasse fiber. **Wood and Fiber Science**, Pennsylvania, v. 23, n. 1, p. 15-22, 1991.

ROYALPLÁS. Adesivos para a indústria da madeira. In: ADESIVOS PARA A INDÚSTRIA DA MADEIRA. 2., 2002, São Paulo. **Anais...** Curitiba: Royalplás, 2002. p. 1-44.

SANCHOTENE, M. É bagaço, mas tem energia. **Gazeta do Povo – Paraná.** 06 nov. 2007. Disponível em: <<http://www.gazetadopovo.com.br/caminhosdocampo/conteudo.phtml?tl=1&id=710526&tit=-bagaço-mas-tem-energia>>. Acesso em: 03 mar. 2010.

SANTOS, M.P.; AGUILAR, M.T.P. Painéis de madeira como vedação vertical em construções. **Cadernos de Arquitetura e Urbanismo**, Belo Horizonte, v. 14, n. 15, p. 242-263, dez. 2007.

SAVASTANO JR., H. **Materiais à base de cimento reforçados com fibra vegetal: reciclagem de resíduos para a construção de baixo custo.** 2000. 144 p. Tese (Livre-Docência) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2000.

\_\_\_\_\_. **Utilização de resíduos na construção habitacional.** (Coletânea Habitare, 4). Disponível em: <<http://www.habitare.org.br/pdf/publicacoes/arquivos/128.pdf>>. Acesso em: 31 dez. 2011.

SHUPE, T.F.; GROOM, L.H.; EBERHARDT, T.L.; RIALS, T.G.; HSE, C.Y.; PESACRETA, T. Mechanical and physical properties of composite panels manufactured from Chinese tallow tree furnish. **Forest Products Journal**, Madison, v. 56, n. 6, p. 64-67, June 2006.

SJOSTROM, E. **Wood chemistry: fundamentals and applications.** 2<sup>nd</sup> ed. San Diego: Academic Press, 1993. 293 p.

SKYSCAN. **SkyScan1172 high-resolution micro-CT.** Disponível em: <<http://www.skyscan.be/products/1172.htm>>. Acesso em: 21 out. 2010.

SOARES, B.M.C.; SARON, E.S. Microanálise elementar de materiais: aplicação do sistema MEV-EDX. **Instituto de Tecnologia de Alimentos**, Campinas, v. 22, n. 1, p. 1-4, jan./mar. 2010.

STEPPE, K.; CNUUDE, V.; GIRARD, C.; LEMEUR, R.; CNUUDE, J.P.; JACOBS, P. Use of X-ray computed microtomography for non-invasive determination of wood anatomical characteristics. **Journal of Structural Biology**, Orlando, v. 148, p. 11-21, 2004.

SURREL, Y. Deflectometry: a simple and efficient noninterferometric method for slope measurement. In: SEM INTERNATIONAL CONGRESS ON EXPERIMENTAL MECHANICS, 10., 2004, Costa Mesa. **Proceedings...** Costa Mesa: Society for Experimental Mechanics, 2004. p. 1-8.

TANOBE, V.O.A. **Caracterização de fibras de esponjas de *Luffa cylindrica* para utilização em compósitos com matriz polimérica**. 2003. 139 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais e Processos) – Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2003.

TAVALERA, F.J.F.; GUZMAN, J.A.S.; RICHTER, H.G.; DUENAS, R.S.; QUIRARTE, J.R. Effect of production variables on bending properties, water absorption and thickness swelling of bagasse/plastic composite boards. **Industrial Crops and Products**, Amsterdam, v. 26, p. 1–7, 2007.

TAYLOR, A.; VIA, B.K. Potential of visible and near infrared spectroscopy to quantify phenol formaldehyde resin content in oriented strandboard. **European Journal of Wood and Wood Products**, Heidelberg, v. 67, p. 3-5, 2009

TEIXEIRA, A.A. **Painéis de bambu para habitações econômicas: avaliação do desempenho de painéis revestidos com argamassa**. 2002. 204 p. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) - Universidade de Brasília, Brasília, 2006.

TEIXEIRA, D.E.; COSTA, A.F.; SANTANA, M.A.E. Aglomerados de bagaço de cana-de-açúcar: resistência natural ao ataque de fungos apodrecedores. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, n. 52, p. 29-34, 1997.

TEIXEIRA, D.E.; GARLET, A.; SANCHES, K.L. Resistance of particleboard panels made of agricultural residues and bonded with synthetic resins or PVC plastic to wooding root fungi. **Cerne**, Lavras, v. 15, n. 4, p. 413-420, out./dez. 2009.

TOMAZELLO FILHO, M. **Formação e anatomia da madeira: exercícios práticos**. Piracicaba: ESALQ, 2002. 76 p.

\_\_\_\_\_. **Efeito da irrigação e fertilização nas propriedades do lenho de árvores de *Eucalyptus grandis* x *urophylla***. 2009. 134 p. Tese (Livre-Docência) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2009.

TOMAZELLO FILHO, M.; BRAZOLIN, S.; CHAGAS, M.P.; OLIVEIRA, J.T.S.; BALLARIN, A.W. Application of X-ray technique in nondestructive evaluation of eucalypt wood. **Maderas. Ciencia y Tecnologia**, Concepcion, v. 10, n. 2, p. 139-149, 2008.

TORQUATO, L.P.; IWAKIRI, S.; BONDUELLE, G.M.; ALBUQUERQUE, C.E.C.; MATOS, J.L.M. Avaliação das propriedades físicas e mecânicas de painéis de fibra de média densidade (MDF) produzidos pelas indústrias brasileiras. **Floresta**, Curitiba, v. 40, n. 2, p. 275-280, 2010.

TRTIK, P.; DUAL, J.; KEUNECKE, D.; MANNES, D.; NIEMZ, P. 3D imaging of microstructure of spruce wood. **Journal of Structural Biology**, Orlando, v. 159, n. 1, p. 46-55, 2010.

TSUCHIKAWA, S. A review of recent near infrared research for wood and paper. **Applied Spectroscopy Reviews**, New York, v. 42/43, p. 43 - 71, 2007.

UNIÃO DA INDÚSTRIA DE CANA-DE-AÇÚCAR. **Cana-de-açúcar processada pelas usinas brasileiras**: produção cana-de-açúcar no Brasil. Disponível em: <<http://www.unica.com.br/downloads/estatisticas/processcanabrasil.xls>>. Acesso em: 23 fev. 2010.

UNITED STATES. Department of Agriculture. Forest Service. Forest Products Laboratory. **Wood handbook**: wood as an engineering material. Madison, 1999. 463 p.

VALE, A.T.; GENTIL, L.V. Produção e uso energético de biomassa e resíduos agrofloretais. In: OLIVEIRA, J.T.S.; FIEDLER, N.S.; NOGUEIRA, M. (Org.). **Tecnologias aplicadas ao setor madeireiro III**. Jerônimo Monteiro: UFES, 2008. cap. 8, p. 195-242.

VAN DEN BULCKE, J.; BOONE, M.; VAN ACKER, J.; VAN HOOREBEKE, L. Three-dimensional X-ray imaging and analysis of fungi on and in wood. **Microscopy and Microanalysis**, New York, v. 15, n. 5, p. 395-402, 2009b.

VAN DEN BULCKE, J.; BOONE, M.; VAN ACKER, J.; STEVENS, M.; VAN HOOREBEKE, L. X-ray tomography as a tool for detailed anatomical analysis. **Annals of Forest Science**, Les Ulis, v. 66, n. 5, p. 508, 2009a.

VASSILIOU, V.; BARBOUTIS, I. Screw withdrawal capacity used in the eccentric joints of cabinet furniture connectors in particleboard and MDF. **Japan Wood Science**, Kyoto, v. 51, p. 572–576, 2005.

VECCHIET, M.; JODICE, R. Experiments in the production of giant reed (*Arundo donax* L.) biomass. In: EUROPEAN BIONERGY CONFERENCE, 9., 1996, Copenhagen. **Proceedings...** Copenhagen, 1996.

VIANA, L.C.; TRUGILHO, P.F.; HEIN, P.R.G; LIMA, J.T.; SILVA, J.R.M. Predicting the morphological characteristics and basic density of Eucalyptus wood using NIR technique. **Revista Cerne**, Lavras, v. 15, n. 4, p. 421-429, out./dez. 2009

XING, C; RIEDL, B; CLOUTIER, A. Measurement of urea-formaldehyde resin distribution as a function of MDF fiber size by laser scanning microscopy. **Wood Science and Technology**, New York, v. 37, p. 495 – 507, 2004.

YE, P.X.; JULSON, J.; KUO, M.; WOMAC, A.; MYERS, D. Properties of medium density fiberboards made from renewable biomass. **Bioresources Technology**, Amsterdam, v. 98, p. 1077–1084, 2007.



YOUSEFI, H. Canola straw as a bio-waste resource for medium density fiberboard (MDF) manufacture. **Waste Management**, Tucson, v. 29, p. 2644–2648, 2009.

WANG, X.; MOHAMMAD, M.; HU, L.J.; SALENIKOVICH, A. Evaluation of density distribution in wood-based panels using X-ray scanning. **The Journal of Nondestructive Testing**, v. 11, n. 4, Apr. 2006. Disponível em <<http://www.ndt.net/article/v11n04/wang/wang.htm>>. Acesso em: 18 jan. 2009.

WANG, W.; ZANG, X.; LU, R. Low formaldehyde emission particleboard bonded by UF-MDI mixture adhesive. **Forest Products Journal**, Madison, v. 54, n. 9, p. 36-39, Sept. 2004.

WERNERSSON, E.L.G.; BRUN, A.; C.L.L.HENDRIKS. Segmentation of wood fibres in 3D CT images using graph cuts. **Lecture Notes in Computer Science**, Heidelberg, v. 5716, p. 92-102, 2009.

WIDYORINI, R.; XU, J.; UMEMURA, K.; KAWAI, S. Manufacture and properties of binderless particleboard from bagasse. I: Effects of raw material type, storage methods, and manufacturing process. **Journal of Wood Science**, Tokyo, v. 51, p. 648–654, 2005.

WONG, E.D.; ZHANG, M.; WANG, Q.; HAN, G.; KAWAI, S. Formation of the density profile and its effects on the properties of fiberboard. **Journal of Wood Science**, Tokyo, v. 46, p. 202-209, 2000.

WORKMAN, J.; WEYWER, L. **Practical guide to interpretive near-infrared spectroscopy**. Boca Raton: CRC Press, 2007. 347 p.

WU, D.; PENG, X.F. Investigation of water migration in porous material using micro-CT during wetting. **Heat Transfer—Asian Research**, New York, v. 36, n. 4, p. 198-207, 2007.

ZAHRI, S.; MOUBARIK, A.; CHARRIER, F.; CHAIX, G.; BAILLÈRES, H.; NEPVEU, G.; CHARRIER, B. Quantitative assessment of total phenol content of European oak (*Quercus petraea* and *Quercus robur*) by diffuse reflectance NIR spectroscopy on solid wood surfaces. **Holzforschung**, Berlin, n. 62, 679-687, 2008.

ZEGARRA, B.E.V. **Caracterização da estrutura anatômica e da densidade do lenho de árvores de *Pinus taeda* e efeito nas propriedades tecnológicas dos painéis OSB**. 2011. 114 p. Dissertação (Mestrado em Tecnologia de Produtos Florestais) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2011.