

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

**Caracterização e alterações na estrutura anatômica da madeira do
Eucalyptus grandis em três condições de desfibramento e efeito nas
propriedades tecnológicas de painéis MDF**

Ugo Leandro Belini

**Dissertação apresentada para obtenção do título
de Mestre em Recursos Florestais, com opção em
Tecnologia de Produtos Florestais**

**Piracicaba
2007**

Ugo Leandro Belini
Engenheiro Florestal

**Caracterização e alterações na estrutura anatômica da madeira do
Eucalyptus grandis em três condições de desfibramento e efeito nas
propriedades tecnológicas de painéis MDF**

Orientador:

Prof. Dr. MARIO TOMAZELLO FILHO

**Dissertação apresentada para obtenção do título de
Mestre em Recursos Florestais, com opção em
Tecnologia de Produtos Florestais**

Piracicaba

2007

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
DIVISÃO DE BIBLIOTECA E DOCUMENTAÇÃO - ESALQ/USP**

Belini, Ugo Leandro

Caracterização e alterações na estrutura anatômica da madeira do *Eucalyptus grandis* em três condições de desfibramento e efeito nas propriedades tecnológicas de painéis MDF / Ugo Leandro Belini. - - Piracicaba, 2007.
89 p. : il.

Dissertação (Mestrado) - - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, 2007.
Bibliografia.

1. Anatomia vegetal 2. Chapa de fibra 3. Desfibramento 4. Eucalipto 5. Madeira
I. Título

CDD 634.9734

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

Dedico

A meus pais Edno e Shirley, pela luta e orgulho deste feito alcançado.

A meus irmãos Juliano e Alessandra, por sempre torcerem, de coração.

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. *Mario Tomazello Filho*, pela orientação, franqueza, amizade e constante disponibilidade para o desenvolvimento do presente trabalho.

A Duratex S.A, nas pessoas do Diretor Industrial Dr. *Mario Colombelli Filho*, Gerente de Engenharia *Carlos Nogueira da Gama Neto* e Gerente de Desenvolvimento *Francisco de Assis Guimarães*, pela liberação para o curso e disponibilidade da estrutura fabril.

Ao Eng. *José Reinaldo Sartori Astolphi*, chefe da Área de Processo MDF, pelo fundamental apoio durante o curso e obtenção do material analisado.

Ao Eng. Florestal *Matheus Peres Chagas*, um agradecimento especial pelo inestimável apoio durante todo o decorrer das avaliações.

Ao Prof. Dr. *Carlos Tadeu dos Santos Dias*, pelo grande auxílio nas análises estatísticas.

Aos Profs Drs. *José Tarcísio da Silva Oliveira* e *Geraldo Bortoletto Júnior*, pelas importantes contribuições para melhoria da dissertação.

Aos Técnicos *Djai Artioli Munhoz* e *Luis Carlos Stuchi*, pelo apoio nos ensaios tecnológicos dos painéis e microscopia, respectivamente, e aos Colaboradores e amigos das Unidades de Botucatu e Agudos.

À Técnica *Maria Aparecida R. Bermudez* pelo preparo das lâminas histológicas do lenho.

Ao Núcleo de Apoio à Pesquisa em Microscopia (NAP/MEPA) pela disponibilidade para a obtenção das imagens no MEV.

Aos Professores da Área de Tecnologia de Produtos Florestais do Departamento de Ciências Florestais da ESALQ/USP.

Aos amigos do Laboratório de Anatomia e Identificação de Madeiras do LCF em especial ao *Carlos Sette Jr.* e *Angel Thiane B. Ferreira* e do Programa de Pós Graduação em Recursos Florestais do Departamento de Ciências Florestais da ESALQ/USP

SUMÁRIO

RESUMO.....	8
ABSTRACT	9
LISTA DE FIGURAS	10
LISTA DE TABELAS	12
1 INTRODUÇÃO	13
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	16
2.1 Características anatômicas da madeira de eucalipto	16
2.2 O painel de fibra de média densidade – painel MDF	18
2.3 Os componentes celulares na confecção de painéis MDF	19
2.4 A refinação dos cavacos de madeira e as características dos componentes celulares e propriedades dos painéis	21
2.5 O método Bauer McNett de classificação de fibras	24
2.6 Aditivos na fabricação de painéis MDF	25
2.6.1 Resina uréia-formaldeído	25
2.6.2 Emulsão de parafina	26
2.6.3 Catalisador	26
2.6.4 Emissão de formaldeído	26
2.7 Aplicações do painel MDF	27
2.8 Aspectos do mercado de painéis no Brasil e no mundo	28
2.9 Propriedades tecnológicas de painéis MDF de eucalipto	31
3 MATERIAL E MÉTODOS	32
3.1 Espécie – origem, idade, transporte e armazenamento das toras	32
3.2 Fluxograma com etapas do processo produtivo do painel MDF	32
3.3 Componentes fibrosos avaliados e análises laboratoriais realizadas	33
3.4. Cavacos de madeira de eucalipto	35
3.4.1 Obtenção dos cavacos de madeira de eucalipto no picador	35
3.4.2 Coleta das amostras de cavacos de madeira	35
3.4.3 Avaliação dos cavacos de madeira	36
3.4.3.1 Densidade básica	36
3.4.3.2 Classificação granulométrica dos cavacos (% retenção)	37
3.4.3.3 Determinação da espessura média dos cavacos (mm)	37
3.4.3.4 Caracterização microscópica dos elementos de vaso	38
3.4.3.5 Caracterização das dimensões das fibras	39
3.4.3.6 Exame dos elementos anatômicos da madeira dissociados sob microscopia eletrônica de varredura (MEV)	40
3.5 Desfibramento dos cavacos de madeira de eucalipto	40

3.5.1 Condições de desfibramento dos cavacos de madeira	40
3.5.2 Coleta do material desfibrado dos cavacos de madeira	41
3.5.3 Insumos utilizados na confecção dos painéis MDF de madeira de eucalipto	42
3.5.3.1 Resina	42
3.5.3.2 Emulsão de parafina	42
3.5.3.3 Catalisador	42
3.5.4 Avaliação dos componentes celulares após o desfibramento dos cavacos de Madeira	43
3.5.4.1 Classificação dos componentes celulares	43
3.5.4.2 Aspectos visuais dos componentes celulares	43
3.5.4.3 Caracterização microscópica dos componentes celulares	43
3.5.4.4 Comprimento médio dos componentes celulares	44
3.5.4.5 Exame dos componentes após desfibramento sob de microscopia eletrônica de varredura (MEV).	44
3.6 Confecção de painéis MDF de madeira de eucalipto	45
3.6.1 Confecção de painéis MDF em condições industriais	45
3.6.1.1 Coleta dos painéis MDF de eucalipto	45
3.6.2 Confecção dos painéis MDF em condições de laboratório	45
3.6.3 Determinação das propriedades tecnológicas dos painéis MDF	46
3.6.4 Painéis MDF de linha de produção x painéis MDF de escala laboratorial	50
3.6.5 Aspectos visuais dos componentes celulares no centro dos painéis	51
3.6.6 Exame da região central dos painéis MDF sob de microscopia eletrônica de varredura (MEV)	51
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	52
4.1 Avaliação dos cavacos de madeira	52
4.1.1 Densidade básica dos cavacos	52
4.1.2 Classificação granulométrica dos cavacos (% retenção)	53
4.1.3 Determinação da espessura média dos cavacos (mm)	55
4.1.4 Caracterização microscópica dos elementos de vaso	56
4.1.5 Caracterização dos componentes celulares dos cavacos	57
4.1.6 Exame dos elementos anatômicos da madeira dissociados sob microscopia eletrônica de varredura (MEV)	59
4.2 Avaliação dos componentes celulares após o desfibramento dos cavacos de madeira	59
4.2.1 Classificação dos componentes celulares	59
4.2.2 Aspecto visual dos componentes celulares	62
4.2.3 Caracterização dos componentes celulares	63
4.2.4 Comprimento médio dos componentes celulares.....	68
4.2.5 Exame dos componentes após desfibramento sob de microscopia eletrônica de varredura (MEV)	69

4.3 Determinação das propriedades tecnológicas dos painéis MDF	70
4.4 Painéis MDF de linha de produção x Painéis MDF de escala laboratorial	75
4.5 Aspectos visuais dos componentes celulares no centro dos painéis	76
4.6 Exame da região central dos painéis MDF sob microscopia eletrônica de varredura (MEV).....	78
5 CONCLUSÕES	80
REFERÊNCIAS.....	81
ANEXOS.....	87

RESUMO

Caracterização e alterações na estrutura anatômica da madeira do *Eucalyptus grandis* em três condições de desfibramento e efeito nas propriedades tecnológicas de painéis MDF

Constata-se, atualmente, uma grande demanda de crescimento na produção de painéis MDF de madeira de eucalipto em relação à do pinus, comumente utilizada na indústria. Pelo exposto, o presente trabalho teve como objetivo caracterizar os componentes morfológicos da madeira de cavacos de *Eucalyptus grandis*, “*in natura*” e submetidas a três condições diferentes de desfibramento (tempo, pressão e energia), sendo denominadas de condição intermediária, de menor e de maior intensidade de refino (A, B e C, respectivamente). As características tecnológicas das chapas MDF obtidas para as três condições de desfibramento foram, da mesma forma, analisadas segundo a norma NBR 15316. No desenvolvimento do trabalho foram coletados para as três condições de desfibramento, em toda a cadeia produtiva do painel MDF: cavacos de madeira, material lenhoso desfibrado e painéis MDF final em escala industrial e laboratorial. Os cavacos de madeira foram caracterizados com respeito a sua estrutura microscópica; o material lenhoso desfibrado nas 3 condições foi avaliado através do seu fracionamento em peneiras seguindo-se a classificação morfológica e a caracterização microscópica dos componentes celulares de cada fração. Os resultados mostraram que os cavacos de madeira coletados no silo da unidade fabril apresentaram-se homogêneos nas 3 pré-condições avaliadas e não exerceram qualquer influência nos tratamentos. A condição de desfibramento mais branda induziu a formação de feixes de fibra e manutenção de vasos e parênquima com as fibras apresentando maior comprimento médio. A condição de desfibramento mais drástica induziu o rompimento da parede das fibras, com polpa apresentando fibras de menor comprimento e com baixa frequência de vasos e de parênquima. As características de coloração foram observadas, sendo que a massa de fibras mais escura foi decorrente da alta pressão, maior tempo e mais energia de refinação aplicada. Os painéis MDF obtidos na condição mais branda apresentaram maior resistência ao arranque de parafuso, ao contrário dos painéis MDF confeccionados com polpa da condição de desfibramento mais drástica mostrando menores propriedades mecânicas de resistência à tração perpendicular e superficial e maiores valores de inchamento e de absorção. Os resultados do trabalho evidenciam a importância das variáveis de produção relacionadas com os tratamentos da madeira e do material fibroso nas propriedades tecnológicas dos painéis MDF de eucalipto.

Palavras-chave: Painel MDF; Anatomia da madeira; *Eucalyptus grandis*; Desfibramento da madeira, Chapa de fibra de média densidade

ABSTRACT

Characterization and anatomical structure alterations of *Eucalyptus grandis* wood in three refining conditions and effect in technological properties of MDF panels

Currently is evidenced a great demand of growth in eucalypts MDF panels production in relation with pinus, commonly used in the industry. The present study had the objective to characterize the morphologic components of *Eucalyptus grandis* wood chips "in natura" submitted in three different refining conditions (time, pressure and energy), named intermediate, smaller and biggest intensity of refining (A, B and C, respectively). The technological characteristics of MDF panels from three refining conditions were analyzed according standard NBR 15316. During this development were collected for three refining conditions, in all the productive chain of the MDF panels: wood chips, wooden dissociated material and panels MDF in industrial and laboratorial scale. The wood chips structure were microscopically characterized; the dissociated wood cells suspended in water of 3 refining conditions were evaluated through its separation in sieves and each fraction of woody material was morphologically classified and microscopically described. The results showed that the wood chips collected in industry storage compartment were homogeneous in the 3 refining pre-conditions and not influenced the MDF panel's treatments. The softness refining condition induced the shives formation and maintenance of vessels, parenchyma and the longest fibers. The more drastic refining condition induced the fiber cell walls broking, with wood pulp presenting shortest fibers and lower vessels and parenchyma frequency. The coloration characteristics were observed, and the fiber pulp was darker as result of the high pressure, greater time and more refinement energy applied. The MDF panels elaborated by softness refining condition presented greater resistance to screw pull in contrast of panels confectioned with hardness refining condition showing lesser mechanical properties of perpendicular and superficial tensile strength and bigger values of swelling and absorption. The results showed the importance of the variable related production with the wood and pulp wood treatments in technological properties of eucalypts MDF panels.

Word-key: MDF panel; Wood anatomy; *Eucalyptus grandis*; Wood refining, Medium density fiberboard

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Ruptura da camada S2 e ângulo das microfibrilas de traqueíde de <i>Pinus radiata</i> (adap.: Chapman 2002).	20
Figura 2 - Camadas da parede celular-lamela média (ML), indicando a região de separação das fibras dos cavacos na fabricação de painéis MDF (adap.: Basile et al 1985).	23
Figura 3 - Fluxograma ilustrativo com as etapas do processo de confecção de painéis MDF.	33
Figura 4 - Componentes de processo avaliados e análises realizadas.	34
Figura 5 - Fluxograma ilustrativo da conversão das toras em cavacos de eucalipto.	35
Figura 6 - Seção transversal do lenho de cavaco de madeira de eucalipto. A-B determinação do número total, diâmetro tangencial e da área ocupada pelos vasos. Barra = 300 µm ...	38
Figura 7 - Avaliação das dimensões das fibras do lenho de cavaco de madeira de eucalipto – A – comprimento (barra: 500 µm), B – largura e C – diâmetro do lume (barra: 100µm) ..	40
Figura 8 - Figura 8 - Ensaio de qualidade tecnológica dos painéis MDF de eucalipto, nas 3 condições de desfibramento. A - módulo de ruptura e de elasticidade; B - resistência à tração perpendicular; C - resistência superficial; D - resistência ao arranque de parafuso face; E - ensaio de inchamento e absorção em banho termostaticado; F – resistência ao arranque de parafuso topo.	48
Figura 9 - Amostragem dos corpos de prova de painéis MDF de eucalipto produzidos em linha industrial, nas 3 condições de desfibramento, para os ensaios de qualidade tecnológica.	49
Figura 10 - Amostragem dos corpos de prova de painéis MDF de eucalipto produzidos em escala laboratorial, nas 3 condições de desfibramento, para os ensaios de qualidade tecnológica.	50
Figura 11 - Percentual de retenção dos cavacos de eucalipto em peneira vibratória, por pré-condição de desfibramento.	54
Figura 12 - Ilustrativo da morfologia dos cavacos de madeira de eucalipto retidos nas peneiras classificatórias e no compartimento do fundo.	55
Figura 13 - Elementos anatômicos dissociados da madeira de eucalipto sob microscopia e eletrônica de varredura. Fibras (F) e elemento de vaso (V) (Figuras com 200, 500, 2000x de ampliação, respectivamente).	59
Figura 14 - Percentual de retenção de fibras de cavacos de madeira de eucalipto, submetidos a três diferentes tratamentos de desfibramento, em quatro diferentes peneiras.	60
Figura 15 - Aspecto visual dos componentes celulares dos cavacos de madeira do eucalipto, submetidos a três diferentes tratamentos de desfibramento (A), (B) e (C) com ampliação de 35x.	63
Figura 16 - Componentes celulares da madeira dos cavacos de eucalipto submetidos a 3 condições de desfibramento e classificados em peneiras de 20-35-65-150 mesh.....	66

Figura 17 -	Imagens em MEV dos componentes celulares após desfibramento para as condições praticadas (A-B-C), em ampliações de 200, 500, 1000 e 2000x.	70
Figura 18 -	Perfis de densidade dos painéis confeccionados em laboratório e em linha de produção.	76
Figura 19 -	Características da superfície dos painéis MDF de componentes celulares da madeira do eucalipto, em três diferentes tratamentos de desfibramento. (A, B, C) (50 X ampliação).....	77
Figura 20 -	Estrutura dos painéis MDF confeccionados com fibras de cavacos de madeira de eucalipto, submetida a três diferentes tratamentos de desfibramento (A, B, C), sob microscopia eletrônica de varredura. (200, 500, 1000 e 2000x).	79

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 -	Variação das dimensões das fibras de <i>E. grandis</i> , aos 7anos, em relação a altura do tronco (adap.: Rocha et al. 2004).	17
Tabela 2 -	Panorama das empresas produtoras de painéis de partículas e fibra no Brasil.	28
Tabela 3 -	Capacidade produtiva atual e previsão futura para diversos tipos de painéis.	29
Tabela 4 -	Número de linhas de painéis MDF e capacidade produtiva mundial (adap. MDF YEARBOOK, 2005).	30
Tabela 5 -	Caracterização das variáveis de desfibramento dos cavacos de madeira de eucalipto, nas condições de produção de painéis MDF.	41
Tabela 6 -	Características da resina uréia formol utilizada no experimento.	42
Tabela 7 -	Características da emulsão de parafina utilizada no experimento.	42
Tabela 8 -	Densidade básica dos cavacos de madeira de eucalipto submetidos a 3 condições prévias de desfibramento.	52
Tabela 9 -	Percentual de retenção dos cavacos de madeira de eucalipto em peneira vibratória, por pré-condição de desfibramento.	53
Tabela 10 -	Espessura (mm) dos cavacos utilizados, por amostra e pré-condição de desfibramento.	55
Tabela 11 -	Freqüência, diâmetro e % dos elementos de vaso nos cavacos de madeira de eucalipto, nas 3 pré - condições de desfibramento.	56
Tabela 12 -	Comprimento, largura, diâmetro do lume e espessura da parede das fibras da madeira dos cavacos de eucalipto, utilizados nas 3 pré-condições de desfibramento.	58
Tabela 13 -	Porcentagem de retenção de fibras de cavacos de madeira de eucalipto, submetidos a três diferentes tratamentos de desfibramento, em 4 diferentes peneiras.	60
Tabela 14 -	Percentual de fibras quebradas e número de feixes de fibras, vasos e parênquima dos componentes celulares dos cavacos de madeira do eucalipto, submetidos a três diferentes tratamentos de desfibramento.	65
Tabela 15 -	Comprimento, largura, diâmetro do lume e espessura da parede das fibras dos cavacos de madeira do eucalipto após desfibramento em três condições diferentes.	68
Tabela 16 -	Propriedades tecnológicas dos painéis MDF de fibras de cavacos de madeira de eucalipto, submetida a três diferentes tratamentos de desfibramento (A, B, C), confeccionados em linha de produção.	73
Tabela 17 -	Propriedades tecnológicas dos painéis MDF de fibras de cavacos de madeira de eucalipto, submetida a três diferentes tratamentos de desfibramento (A, B, C), confeccionados em condições de laboratório.	74

1 INTRODUÇÃO

A Europa foi berço do desenvolvimento dos painéis MDF utilizando a madeira de árvores de *Pinus spp* como matéria prima face sua disponibilidade e acessibilidade às indústrias de diversos países. A difusão de painéis MDF de coníferas aliada ao desenvolvimento e aprimoramento de equipamentos criou um paradigma universal para chapas MDF com coloração relativamente clara.

No Brasil, a primeira linha produtiva de painéis MDF teve seu início em 1997 utilizando a madeira de espécies de *Pinus spp* como matéria prima exclusiva até 2003. A partir desta data teve início uma linha de produção exclusiva de MDF utilizando como matéria prima a madeira de *Eucalyptus*.

As grandes áreas reflorestadas com espécies de *Pinus* nos estados das regiões sul e sudeste do país, oriundas dos incentivos fiscais da década de 80, transformaram-se em excelentes fontes de madeira, justificando a instalação de unidades industriais produtoras de painéis MDF. A matéria prima atendia plenamente as necessidades das indústrias, pela existência de árvores de grande diâmetro e alto rendimento na conversão m^3 madeira/ m^3 painel MDF (face alta densidade da madeira) resultando em chapas de coloração clara: uma exigência de mercado.

Atualmente, os segmentos florestal e industrial deparam-se com a escassez da madeira de árvores de coníferas de maiores diâmetros, prioritariamente destinadas aos segmentos de madeira serrada e de compensados. As empresas verticalizadas de painéis têm utilizado em maior intensidade madeira de árvores de menores idades, defrontando-se com a madeira denominada de juvenil, de menor densidade, maior relação lenho inicial/tardio, menores dimensões das traqueídes (fibras), maior teor de umidade, dentre outros inconvenientes. Esta nova realidade abriu a oportunidade para a confecção de painéis MDF fabricados com madeira de folhosas ou de sua mistura com a de coníferas.

A produção de painéis MDF tendo como matéria prima a madeira de eucalipto apresenta algumas vantagens comparativas em relação a de pinus, tais como (i) menor ciclo de corte das árvores e de rotação das plantações, na faixa de 6 anos, (ii) maior rendimento na conversão m^3 madeira / m^3 MDF, devido a maior densidade da madeira;

(iii) possibilidade de utilização integral das toras, incluindo a casca (removida na utilização de *Pinus*), (iv) fibras de menor comprimento proporcionando melhor qualidade das chapas MDF após a usinagem, para uma mesma energia de desfibramento aplicada. Porém, sendo a madeira de eucalipto uma matéria prima recente para confecção de chapas MDF, há necessidade de desenvolvimento e otimização das variáveis de processo, como por exemplo as envolvidas na etapa de desfibramento.

A utilização de painéis MDF embute a grande vantagem da homogeneidade nas características tecnológicas e de aparência, obtendo-se produtos de diferentes dimensões e aplicações, com possibilidade de adequações no processo de confecção visando performance requerida ao seu uso final. Como exemplos, podem ser obtidas variações em densidade básica das chapas e nos valores de propriedades tecnológicas visando usos específico, e até a incorporação de aditivos conferindo características especiais, como resistência à umidade para utilização como substrato de pisos laminados.

Pelo exposto, o presente trabalho teve como objetivos a caracterização dos componentes anatômicos da madeira de árvores de *Eucalyptus grandis* submetida a 3 diferentes condições de desfibramento. Na seqüência, foram determinadas as características tecnológicas das chapas MDF, obtidas com as diferentes massas de polpa, visando dar maiores subsídios sobre o desempenho da madeira na confecção de chapas MDF.

OBJETIVOS

O objetivo principal do trabalho foi o de caracterizar os componentes celulares da madeira de *Eucalyptus grandis* utilizada no processo de fabricação de chapas MDF, em 3 distintas condições de desfibramento dos cavacos, e sua influência nas características tecnológicas dos painéis confeccionados.

Desta forma, o trabalho constou dos seguintes objetivos específicos:

- Classificação, identificação e comparação dos componentes celulares da madeira de cavacos “in natura” e resultantes do tratamento de 3 condições de desfibramento e utilizados para confecção de painéis MDF;
- Verificação da alteração das características anatômicas das células da madeira submetidas a 3 condições de desfibramento e sua influência nos parâmetros tecnológicos dos painéis MDF.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Características anatômicas da madeira de eucalipto

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 de suas madeiras. Essas células apresentam grande variação em sua forma, relacionadas com as atividades fisiológicas do lenho. Além da caracterização dos elementos anatômicos é importante determinar as dimensões e a disposição dos mesmos nos planos básicos de estudo da madeira, sendo que essas informações possibilitam estabelecer correlações com propriedades físico-mecânicas e utilização da madeira.

Kollmann et al. (1975) descreve que a madeira das coníferas e das folhosas difere significativamente na sua estrutura anatômica. As fibras de folhosas são curtas e a sua espessura da parede é, em modo geral, maior que a das coníferas. As coníferas apresentam aproximadamente 0.6-0.8 milhões de traqueídes/cm³, enquanto que as folhosas de 2-3 milhões de fibras/cm³. O autor afirma, também, que não há dúvidas que algumas propriedades das chapas de MDF dependem do comprimento e da espessura da parede das fibras e traqueídes.

Segundo Gomide (2002) (citando Silva, 1997) a análise dimensional dos componentes celulares da madeira de *Eucalyptus grandis x urophylla* indicou acréscimo da espessura da parede, comprimento e largura de fibras com o aumento da idade, sendo que o comprimento das fibras foi de 0,85 a 0,96 mm para madeira de 4 e 6 anos, respectivamente.

A variação dos elementos anatômicos e seu efeito na qualidade da madeira de árvores dominantes e dominadas de *Eucalyptus grandis*, aos 7 anos, foi analisada por Rocha et al. (2004), determinando os valores das dimensões das fibras conforme a posição de retirada da amostra em relação à altura da árvore, como pode ser visto na Tabela 1. No sentido axial (base-topo) do tronco os maiores valores médios das dimensões das fibras foram observados a 25% da sua altura comercial, excluindo-se apenas diâmetro do lume que apresentou maior valor na base, ou 0% da altura. No sentido radial (medula-casca) as dimensões das fibras e o comprimento e diâmetro tangencial dos vasos mostraram tendências crescentes.

Tabela 1 - Variação das dimensões das fibras de *E. grandis*, aos 7anos, em relação a altura do tronco (adap.: Rocha et al 2004)

Altura (%)	Comprimento (mm)	Diâmetro (µm)	Lume (µm)	Parede (µm)
0 (base)	0,92	19,47	11,99	3,73
25	0,981	19,87	11,88	3,99
50	0,957	19,26	11,52	3,87
75	0,888	18,6	10,62	3,98
100	0,901	17,93	10,92	3,75

Caracterizando a estrutura anatômica da madeira de clones de *Eucalyptus grandis*, com 8 anos, Alzate (2004) detectou camadas de crescimento distintas e demarcadas pela espessura da parede celular das fibras; vasos visíveis a olho nu e sob lente (10x) predominantemente solitários (97%); fibras libriformes de 1,03 mm de comprimento, 20,99 µm de largura, 9,58 µm de diâmetro de lume e 5,7 µm de espessura da parede. A densidade média da madeira estudada pelo autor foi de 460 kg/m³.

Rocha et al. (2004) (citando Batista et al., 2003) verificaram para a madeira de híbridos de *E. grandis* um modelo de variação medula-casca caracterizado pelo aumento do comprimento das fibras e do diâmetro dos vasos e redução da sua frequência. Carvalho (2000) relatou valores médios de 1,1 mm, 17,5, 8,5 e 4,5 µm para o comprimento, largura, diâmetro do lume e espessura da parede das fibras, respectivamente, da madeira de *Eucalyptus grandis x urophylla*, aos 7 anos.

Segundo Ruy & Tomazello Filho (2001) os resultados da análise da madeira de grupos fenotípicos de clones de *Eucalyptus urophylla* indicaram que na seleção de clones superiores devem ser incluídos os parâmetros fenotípicos e de qualidade da madeira, fundamentais para a definição do seu uso final.

De acordo com Fonseca (2001), citado por Gomide (2002), a densidade básica da madeira de árvores de *Eucalyptus grandis* aumenta com o aumento da idade da árvore, pois encontrou valores de 450 a 540 kg/m³ aos 4 e 7 anos, respectivamente.

Avaliando a densidade básica do lenho de árvores de clones de *E. grandis x urophylla*, aos 8 anos, em diferentes porcentagens da altura do tronco, Tomazello Filho (2006) encontrou valores entre 438-568, 484-548 e 492-544 kg/m³ para os três diferentes tratamentos de fertilização e irrigação estudados.

2.2 O painel de fibra de média densidade – painel MDF

MDF corresponde à sigla em inglês de “*Medium Density Fiberboard*” ou painel de fibra de média densidade, sendo também conhecido como chapa de fibra de media densidade.

De acordo com a norma brasileira ABNT NBR 15316-1 (2006), chapas de fibra de média densidade (MDF) são quando o colchão de fibras, na linha de formação, encontra-se com teor de umidade abaixo de 20%, e a densidade da chapa é maior ou igual 450 kg/m³. Essas chapas são produzidas basicamente sob ação de calor e pressão com a adição de adesivo sintético.

Para fins mercadológicos, as chapas podem ser classificadas em:

- a) HDF (High Density Fiberboard): densidade ≥ 800 kg/m³;
- b) Standard: densidade > 650 e < 800 kg/m³;
- c) Light: densidade ≤ 650 kg/m³;
- d) Ultra Light: densidade ≤ 550 kg/m³.

Segundo Iwakiri et al. (2005) os painéis MDF são conceituados como painéis de fibras de média densificação, produzidos a partir de fibras de madeira encoladas normalmente com resina uréia – formaldeído e consolidadas através de prensagem a quente.

De acordo com a Wood Panel Industries Federation (2007) o painel MDF também pode ser designado como um painel de fibra formado através de um processo seco (fibras com umidade menor que 20% na etapa de formação), sendo tipicamente composto por 82% de fibras de madeira, 10% de resina sintética, 7% de água e menos que 1% de parafina.

2.3 Os componentes celulares na confecção de painéis MDF

Segundo ¹Riedl et al. (2006) há limitados estudos sobre a influência das características das fibras no desempenho do painel MDF, em comparação com o abundante número de trabalhos relacionando tais características das fibras e as propriedades do papel. O autor verificou que os painéis MDF de madeira de *Eucalyptus spp* têm 93% de fibras menores do que 1 mm de comprimento.

Iwakiri et al. (2005) indicaram que a madeira utilizada para a produção de painéis de fibras pode ser de coníferas ou de folhosas, sendo preferíveis as das espécies com parede celular fina, por curvarem e se colapsarem mais facilmente, apresentando maior área de contato e contribuindo para maior quantidade de pontes de hidrogênio. Neste aspecto, as fibras da madeira de folhosas são mais curtas e com parede celular mais espessa, sendo que o maior comprimento dos traqueídes das coníferas favorece as condições de formação das chapas.

De acordo com Maloney (1989) a densidade da madeira tem sido utilizada para selecionar as espécies para manufatura de painéis de fibras com valores variando de 0,3-0,5 g/cm³, possibilitando na prensagem painel de média densidade com um bom contato entre as fibras.

Analisando a ruptura de corpos de prova de MDF de *Pinus radiata* sob microscopia eletrônica de varredura, após serem ensaiados à tração perpendicular para determinação da resistência à ligação interna, Chapman et al. (2002) mostraram que a ruptura ocorreu na parede das traqueídes entre as camadas S1 e S2, conforme indicado na Figura 1. Entretanto, os autores não determinaram se o ponto de ruptura representa uma fragilidade inerente à parede das traqueídes ou é resultado do stress induzido nas suas paredes na etapa de refinação. Os autores ressaltam a importância da aplicação de uma resina com partículas bastante pequenas, a fim de facilitar sua difusão através das camadas S1 até a S2, camada esta tida como principal componente estrutural da fibra.

¹ RIEDL, B.; PARK, B.D. Anatomical characteristics of wood-fibers for medium density fiberboard (MDF) manufacture

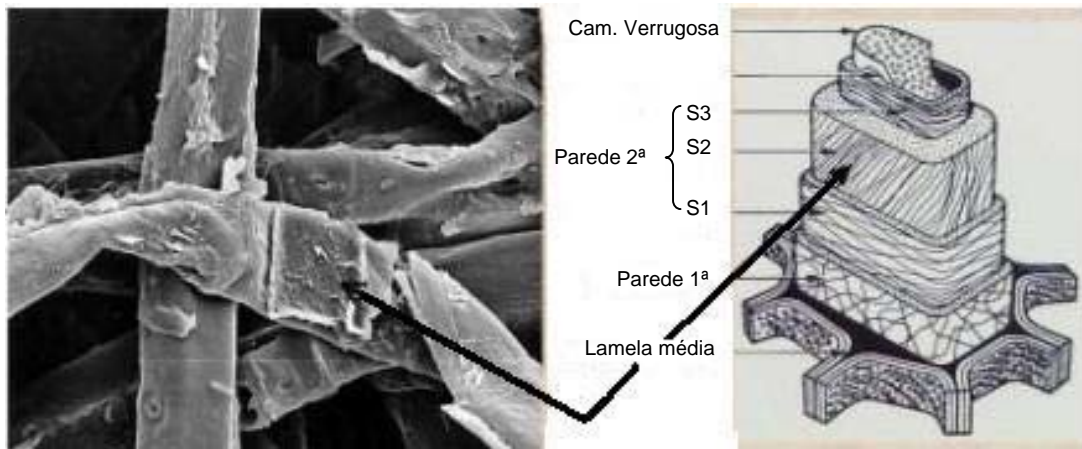


Figura 1 - Ruptura da camada S2 e ângulo das microfibrilas de traqueíde de *Pinus radiata* (adap.: Chapman 2002)

Segundo Pranda (1995) os painéis MDF fabricados com madeira de *Eucalyptus globulus* requereram maior quantidade de adesivos para a obtenção de propriedades mecânicas similares as dos painéis confeccionados com madeira de *Pinus pinaster*. Entretanto, os valores de inchamento e de absorção no painel MDF de eucalipto foram superiores aos de seu similar de pinus: explica-se pela maior porcentagem de partículas finas e maior área específica das fibras de eucalipto após o desfibramento dos cavacos.

Eleotério (2000) avaliou as propriedades físico-mecânicas de painéis MDF de diferentes densidades e teores de resina produzidos a partir de fibras da madeira de *P. oocarpa* e de *Pinus caribaea*. Na análise do comprimento das traqueídes, os elementos celulares inteiros foram agrupados em maior frequência nas classes de 4-5 mm (40% das traqueídes) e nas desfibradas nas classes de 2-3 mm (29,9% das traqueídes). A redução no comprimento médio das traqueídes é indicativa de quebra no desfibramento termo-mecânico, aumentando a variabilidade do comprimento das fibras com o desfibramento.

Avaliando o efeito das dimensões das fibras nas propriedades das chapas MDF, Nelson (1973) verificou que o comprimento das fibras mostra correlação positiva com a estabilidade dimensional das chapas MDF e pequeno ou nenhum efeito nas demais propriedades do painel. Verificou, ainda, que o pH das fibras tem importante relação com as propriedades e a estabilidade linear dos painéis MDF.

Maloney (1985) descreve que o uso de madeira juvenil do tronco das árvores resulta em chapas com propriedades mecânicas inferiores em relação a chapas manufaturadas com madeira adulta.

2.4 A refinação dos cavacos de madeira e as características dos componentes celulares e propriedades dos painéis

Os cavacos de madeira passam inicialmente por um processo de pré – vaporização, posteriormente pelo pré – aquecimento em coluna pressurizada e finalmente pelo desfibramento e refino. O processo de pré - aquecimento consiste no tratamento dos cavacos em coluna pressurizada (com condições controladas de pressão e de tempo de permanência) visando atingir o estado plástico da lignina. Posteriormente, os cavacos passam por discos de desfibramento e refinação (com condições controladas de energia específica e pressão) originando os componentes fibrosos (polpa da madeira), matéria prima para confecção dos painéis MDF. Nos tratamentos dos cavacos de madeira na (i) coluna de desfibramento e na (ii) caixa de discos, a alternância das variáveis: tempo, pressão e abertura entre os discos influenciam diretamente nas dimensões e demais características dos componentes celulares da madeira e, conseqüentemente, nas propriedades dos painéis, de ordem aparente ou tecnológica.

As dimensões dos cavacos, após a passagem das toras de madeira pelas lâminas do picador constituem-se, de acordo com Casey (1980), no controle inicial do processo através da avaliação da distribuição do comprimento x largura e da espessura, sendo os parâmetros de qualidade mais bem estudados e controlados no processo. Segundo a empresa Demuth (2006), seus picadores geram cavacos de madeira com comprimento de 20 a 30 mm, enquanto a Metso Paper (2006) cita cavacos de madeira com de 4,1 mm de espessura, 24,2 mm de largura e 43,4 mm de comprimento em artigo sobre equipamento para controle da qualidade dos cavacos.

Enfatiza-se, também, que a especificação das dimensões dos cavacos de madeira varia nas diferentes unidades industriais, sem haver um padrão único a ser adotado. Neste aspecto, Labosky et al. (1993) afirmam que depois da dosagem de resina, a umidade dos cavacos de madeira durante o seu desfibramento é o parâmetro

que mais afeta as características das fibras e as propriedades dos painéis: as fibras provenientes de cavacos de madeira com baixo teor de umidade apresentam-se inteiras e dispostas em feixes.

Estudando os efeitos da pressão de refinação dos cavacos nas características das fibras e dos painéis MDF, Groom et al. (2004) verificaram que as fibras refinadas entre 2-4 bar de pressão (baixa pressão) eram de coloração mais clara e com aumento no tamanho e no número de fiapos de fibras (shives). As fibras refinadas a 12 bar de pressão (alta pressão) eram mais escuras e com maior número de frações de fibras finas. Através da microscopia eletrônica os autores observaram que as fibras refinadas em baixas pressões mostravam paredes celulares rasgadas; as fibras refinadas em pressões intermediárias tinham superfícies bastante lisas e ligeiramente granuladas devidas, provavelmente, da redeposição dos constituintes no processo de refinação. As fibras refinadas em condições de alta pressão mostraram-se ligeiramente fragmentadas e com predominância de frações finas.

Estudando a superfície das traqueídes e as propriedades mecânicas dos painéis MDF de *Pinus taeda*, Groom et al. (1998) determinaram que a composição das traqueídes de madeira juvenil (MJ) e adulta (MA) indica que o processo de refino altera drasticamente a razão entre estes componentes. Na madeira juvenil macerada, a razão MJ/MA de 1:1 passou para 9:1 após o refino; na madeira adulta a razão MJ/MA passou de 4:6 para 1:9,5. Portanto, as traqueídes de madeira juvenil tornam-se fragmentadas no processo de refino constituindo a fração fina; os traqueídes de madeira adulta tendem a manter-se intactos.

Rodarmel (1995) comenta que a distribuição das dimensões das fibras e redução da ocorrência de fiapos resultantes da operação de refino de cavacos de madeira utilizados na confecção de painéis MDF são influenciadas pela intensidade do refino, sendo que normalmente a fração de finos é aumentada com o acréscimo na demanda energética. Menciona-se, também, que a redução na fração de fibras longas não prejudica as propriedades físicas da chapa MDF e promovendo a formação de superfície mais lisa e densa.

Basile et al. (1985) afirmam que o desfibramento dos cavacos de madeira com vapor pressurizado permite atingir altas temperaturas na zona de refinação,

possibilitando que a lignina da lamela media torne-se mais plástica. A temperatura em que a lignina perde a característica vítrea para um estado plástico é denominada de temperatura de transição vítrea. Sob altas pressões de refinação dos cavacos de madeira (por exemplo: para a fabricação dos painéis de fibra MDF) a lignina ultrapassa o estado de transição vítrea e torna-se plástica tornando mais fácil a sua ruptura ao longo da lamela média (LM) existente entre as fibras (Figura 2).

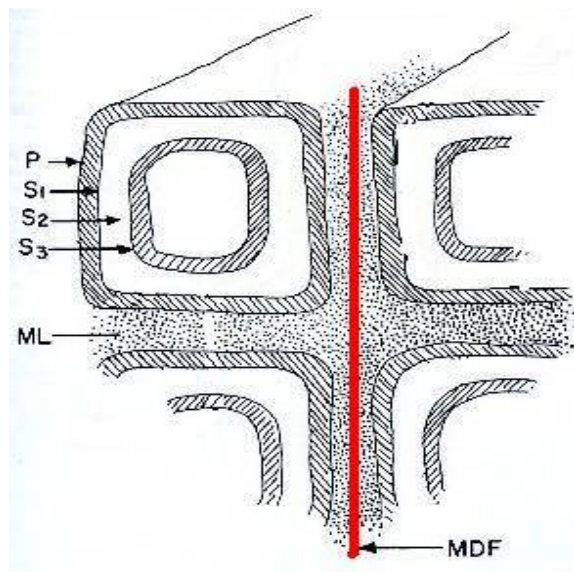


Figura 2 - Camadas da parede celular – lamela média (ML), indicando a região de separação das fibras dos cavacos de madeira na fabricação de painéis MDF (adap.: Basile et al 1985)

Myers (1983) utilizou 4 critérios para a caracterização das fibras, sendo (i) taxa de drenagem, (ii) método de Bauer McNett, (iii) medida do comprimento de um número representativo de fibras e (iv) análise morfológica por microscopia eletrônica de varredura. Procedeu-se a medição das dimensões de 200 fibras para determinação do seu comprimento médio e ao exame de amostras da polpa sob microscópio eletrônico de varredura (ampliações de 200, 1000 e 2000x), sendo ferramenta essencial para o entendimento das modificações das fibras induzidas pelo aumento do refino. Determinou-se que o comprimento das fibras decresce com o aumento da intensidade de refino dos cavacos, confirmando-se pela mensuração do comprimento e indicando a presença dos vasos na madeira desfibrada de *Liquidambar styraciflua* e *Populus tremuloides*.

Xing et al. (2004) afirmam que as diferentes morfologias das fibras resultam em distintas áreas superficiais de fibras. Por outro lado, a quantidade de resina por área depende, principalmente, da área superficial das fibras: geralmente a área superficial específica (m^2/g) de fibras longas é menor do que a das fibras curtas, devido a maior superfície das fibras que sofreram ruptura de suas paredes. No entanto, como a quantidade de resina é baseada no peso das fibras secas, a quantidade de resina por superfície de fibra longa é maior do que a de fibras curtas e maiores conteúdos de resina resultam, geralmente, em melhores propriedades mecânicas dos painéis. Suchsland et al. (1990), citado por Xing (2004), afirmam que a morfologia e estrutura das fibras apresentam grande significância nas propriedades das chapas.

Groom et al. (2004) verificaram a penetração da resina em fibras utilizadas na confecção de painéis MDF, detectando que a migração da resina para a parede e lume das células ocorre através de fraturas resultantes do processo de refin0 dos cavacos que seguem, geralmente, o ângulo das microfibrilas da camada S2 da parede celular.

2.5 O método Bauer McNett de classificação de fibras

Myers (1983) analisando a relação entre as características das fibras e o desempenho dos painéis MDF utilizou o método Bauer McNett para o fracionamento das fibras e posterior determinação do seu comprimento. Pelo método são imersas em água 10 gramas de amostra do painel MDF e a polpa resultante atravessa uma série de peneiras de progressivas aberturas (20, 35, 65, 150 mesh). A massa de polpa retida em cada peneira é seca e pesada e determinado o comprimento médio das fibras contidas na massa, pela aplicação de uma fórmula matemática.

Benaduce (1998) utilizou o método em referência na classificação morfológica das fibras e traqueídes de *Eucalyptus grandis* e de *Pinus caribaea* var. *hondurensis* utilizados na confecção de painéis MDF. Para a massa de polpa de madeira de *E. grandis* obtida em um refinador industrial (9 bar de pressão, 4 min de tempo de pré-aquecimento) a retenção média foi de 13,64-22,82-36,23-17,32-9,98 % em peneiras 20, 35, 65, 150 e < 150 mesh, respectivamente.

O método Bauer McNett foi, também, utilizado por Shi et al. (2005) para determinar a distribuição do comprimento das fibras de *Picea mariana* no estudo do efeito da madeira juvenil nas propriedades dos painéis MDF.

2.6 Aditivos na fabricação de painéis MDF

2.6.1 Resina uréia-formaldeído

De acordo com Royalplás (2002) o desenvolvimento das resinas sintéticas foi responsável pelo impulso na indústria de chapas e de painéis de madeira e a disponibilidade de resinas líquidas a base de uréia formaldeído e fenol formaldeído, a partir de 1930, possibilitou a confecção de chapas de qualidade superior. O segmento industrial de aglomerados de madeira, nos anos 40, foi concebido utilizando as resinas sintéticas como agente aglutinante no processo.

Segundo Iwakiri et al. (2005) a resina uréia formaldeído é utilizada em mais de 90% dos painéis de madeira, pelo seu baixo custo em relação às outras resinas disponíveis, sendo a sua suscetibilidade a degradação hidrolítica na presença de umidade uma de suas desvantagens. A resina uréia - formaldeído é produzida em solução aquosa com conteúdo de sólidos de 60-70%, tem coloração branca, pH de 7,4-7,8, viscosidade de 400-1000 cP (25°C) e a sua cura se processa pela redução do pH por meio da adição de um catalisador ácido e incidência de calor.

De acordo com Pizzi (1994) as resinas uréia formaldeído são as mais importantes e as mais aplicadas na indústria de chapas e painéis de madeira. São polímeros condensados produzidos pela reação entre formol e uréia, tendo como principais vantagens a solubilidade em água, dureza, infusibilidade, boas propriedades térmicas e fácil adaptação às várias condições de cura.

Segundo Benaduce (1998) na fabricação de painéis MDF é usual a aditivação da resina uréia-formaldeído (UF) com sulfato de amônia, que apresenta a função de catalisador da polimerização (cura) da resina.

A relação molar entre o formaldeído e a uréia (F/U) é de 1,2:1 a 2,0:1, de acordo com Iwakiri (2005). As resinas com baixa relação molar (entre 1,2:1 e 1,6:1) caracterizam-se pelo maior tempo de gelatinização (vida útil) e menor conteúdo de formaldeído livre; no entanto, apresentam viscosidade mais elevada, menor resistência

à água (durabilidade), menor resistência mecânica e rigidez e um ritmo de cura mais lento do que as resinas de alta razão molar (entre 1,8:1 e 2,0:1). A relação molar mais empregada é de 1,4:1 a 1,6:1.

Krzysik et al. (2001) utilizaram a dosagem de 10% de resina uréica, com 65% de sólidos, na confecção de painéis MDF de madeira de *Eucalyptus saligna* e Lahr et al. (2004) aplicaram a resina uréica formaldeído com teor de sólidos de 66% e dosagens de 8, 10 e 12% na confecção de painéis MDF laboratoriais de *Eucalyptus grandis*.

2.6.2 Emulsão de parafina

A emulsão de parafina é adicionada à massa de fibras visando proporcionar a propriedade de hidrorrepelência aos painéis. Pode, também, lubrificar os segmentos de disco quando aplicada nos cavacos anteriormente à refinação, sendo, porém, questionável.

Krzysik et al. (2001) utilizaram uma dosagem de 1,5% de emulsão de parafina com 58% de sólidos na confecção de painéis MDF de madeira de *Eucalyptus saligna*. Lahr et al. (2004) não citam a dosagem quando utilizaram a emulsão de parafina comercial com 60% de sólidos na confecção de painéis laboratoriais com madeira de *Eucalyptus grandis*.

2.6.3 Catalisador

Embora certas resinas de uréica formaldeído se curem apenas com a ação do calor é fundamental, em escala industrial, adicionar materiais que acelerem esse processo (Royalplás, 2002). O endurecimento da resina não deve ocorrer durante o seu armazenamento e, portanto, a ação exata da sua cura é resultado da combinação do calor com o agente de cura. Os catalisadores são, quase sempre, usados para as resinas uréicas em aplicação de adesão ou laminação: em geral são substâncias que liberam ácidos como, por exemplo, os sais de amônio.

2.6.4 Emissão de formaldeído

Até a década de 80 as resinas uréicas continham grande quantidade de formaldeído livre para facilitar a produção de aglomerados e de painéis MDF, pela alta

reatividade e maiores velocidades de operação, se acordo com Sundin (2002). A sua grande desvantagem era a emissão de altas quantidades de formaldeído durante o processo de produção dos painéis resultando em forte odor de formaldeído e problemas ambientais nas fábricas. Da mesma forma, as emissões de formaldeído causavam problemas quando as chapas eram utilizadas para pisos, móveis, revestimentos de paredes, etc. As intensas pesquisas na indústria de adesivos resultaram, antes dos anos 80, no desenvolvimento de resinas UF de modo a atender a legislação vigente em certos países, no que diz respeito ao limite de formaldeído livre nos painéis de madeira.

Atualmente, para a produção de painéis MDF é comum utilização de resinas com relação molar F/U de 1,0:1 (resina de baixa emissão de formol, utilizada em produtos classe E1) a 1,3:1 (resina de média emissão de formol, utilizada em produtos classe E2), segundo a norma NBR 15316-2 (2006). A relação entre os dois insumos está condicionada ao consumidor final do painel MDF. O mercado europeu, por exemplo, somente aceita painéis MDF da classe E1, ou seja, aqueles fabricados com resina de baixa relação molar final.

2.7 Aplicações do painel MDF

Atualmente, a grande aceitação mercadológica do painel MDF deve-se, notadamente, a sua excelente trabalhabilidade especialmente nas usinagens de borda e superfícies, oriunda da sua homogeneidade e características finais, tornando-o cada vez mais demandado nas indústrias de móveis e diferenciador de qualidade.

De acordo com Iwakiri et al. (2005) os painéis MDF têm sua produção e consumo crescentes em todo o mundo, com vantagens relacionadas a estrutura mais homogênea, usinabilidade, qualidade no acabamento e aplicação em materiais de revestimento, sendo utilizados na produção de móveis, molduras, portas, etc.

Segundo BNDES (2002) o painel MDF possui consistência e algumas características mecânicas que o aproxima da madeira maciça; difere do painel de madeira aglomerada pelos parâmetros mecânicos de resistência superiores, boa estabilidade dimensional e excelente capacidade de usinagem. Indica que a produção

mundial de painéis MDF duplicou entre 1996-2000 a uma taxa de 18% de crescimento médio anual, com a indústria de móveis a sua principal demandante.

As aplicações do painel MDF, segundo Benaduce (1998), são no setor moveleiro: frontais de cozinhas, banheiros e dormitórios; móveis infantis e de escritório; mesas; cadeiras; racks e molduras. Na construção civil é largamente aplicado em forros, rodapés, pisos laminados, batentes e capas de portas moldadas e como painéis divisórios. Sua versatilidade permite variadas aplicações, tais como em salto de sapatos; pás de ventilador; assento sanitário; cabines telefônicas; brinquedos e as que exigem entalhes e adornos.

2.8 Aspectos do mercado de painéis no Brasil e no mundo

O panorama das empresas fabricantes de painéis de partículas e painéis de fibra instaladas no Brasil e suas respectivas linhas de produtos referentes ao ano de 2006, são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 - Panorama das empresas produtoras de painéis de partículas e fibra no Brasil

Empresa	Chapa Fibra		Aglomerado/MDP			MDF			OSB
	Crú	Pint.	Crú	BP	FF	Crú	BP	FF	
Cel. Arauco y C. S.A.			√	√	√	√	√		
Berneck S.A			√		√				
Duratex S.A	√	√	√	√	√	√	√	√	
Eucatex S.A	√	√	√	√	√				
Fibraplac MDF Ltda						√			
Masisa S.A			√	√		√	√	√	√
Satipel Ind. S.A.			√	√	√				
Tafisa S.A			√	√	√	√	√	√	

MDP = *Medium Density Particleboard* ou Chapa de Partículas de Média Densidade; MDF = *Medium Density Fiberboard* ou Chapa de Fibra de Média Densidade; OSB = *Oriented Strand Board* ou Chapa de Partículas Orientadas. Cru = sem revestimento; Pint. = Pintura/Impressão; BP = Laminação Baixa Pressão; FF = Revestimento *Finish Foil*.

A capacidade produtiva atual e futura (2006-2008) das empresas fabricantes de painéis, em mil m³/ano e de acordo com suas linhas de produtos, é apresentada da

Tabela 3 (Duratex, 2006). Através desta tabela verifica-se um ligeiro crescimento na produção do painel aglomerado ou MDP (*Medium Density Particleboard*) da empresa Satipel Industrial S.A, resultante do aumento do comprimento da prensa contínua. Verificam-se, também, o aumento do padrão produtivo e expressivo crescimento para chapas MDF através da previsão do início de produção de novas linhas, até 2008, das empresas Berneck S.A, Fibraplac Chapas MDF Ltda, Satipel Industrial S.A e Masisa S.A., conforme mídia jornalística; para os painéis de chapa de fibra e OSB não há previsão de expansão da produção.

Tabela 3 - Capacidade produtiva atual e previsão futura para diversos tipos de painéis

Empresas	Chapa Fibra		Aglomerado/MDP		MDF		OSB	
	2006	até 2008	2006	até 2008	2006	até 2008	2006	até 2008
Cel. Arauco y C. S.A.			280	280	340	340		
Berneck S.A			490	490		240		
Duratex S.A	310	310	480	480	600	600		
Eucatex S.A	200	200	320	320				
Fibraplac Ch. MDF Ltda					360	360		
Masisa S.A					240	480	350	350
Satipel Ind. S.A.			700	950		240		
Tafisa S.A			220	220	400	400		
TOTAL	510	510	2490	2740	1940	2660	350	350

Segunda a ABIPA (2006), até o ano de 2010 estima-se que a capacidade nominal produtiva brasileira de painéis MDF estará entre 2,7 a 3,5 milhões de m³/ano, podendo superar a capacidade nominal de produção do painel MDP/aglomerado estimada em 3,2 milhões de m³/ano.

Do total instalado para a produção de painel MDF, em 2006, cerca de 448 Mm³/ano foram confeccionados com madeira de eucalipto, compreendendo uma linha de produção da empresa Duratex S.A. (capacidade de 340 mil m³/ano) e cerca de 30% da produção da Fibraplac Chapas de MDF Ltda (a qual utiliza mistura estimada de pinus e eucalipto com proporções estimadas em 70 e 30%, respectivamente)².

²Informação pessoal.

Assim, 23,1% das chapas MDF produzidas no Brasil, em 2006, utilizaram madeira de eucalipto como matéria prima. Até 2008, há tendência de uso cada vez maior da madeira de eucalipto através de mistura com pinus ou mesmo estabelecimento de plantas para utilização exclusiva de madeira de eucalipto como matéria prima.

O histórico da evolução da participação das espécies de madeiras (pinus vs. eucalipto) utilizadas como matéria prima para produção de chapas MDF no Brasil, revela que no período compreendido entre 1997 e 2002 tal produção baseou-se exclusivamente na madeira de pinus; a partir de 2003, 17% da mesma produção utilizou a madeira eucalipto, sendo que, a partir de 2006, verificou-se que o emprego deste mesmo tipo de madeira foi de 23,1%, demonstrando tendência crescente de participação na produção nacional de MDF.

O número global de plantas de painéis MDF nas principais regiões mundiais de 2003 a 2005 e a evolução das suas capacidades produtivas estão indicados na Tabela 4. Nessa tabela é possível observar um crescimento médio anual de 13,64% da capacidade produtiva e um incremento médio anual no número global de plantas instaladas correspondente a 21,25% (MDF YEARBOOK, 2005).

Tabela 4 - Número de linhas de painéis MDF e capacidade produtiva mundial (adap: MDF YEARBOOK, 2005)

Regiões	Nº Linhas			Cap. Produtiva (m ³ /ano x 10 ³)		
	2003	2004	2005	2003	2004	2005
África	4	4	4	245	245	245
Ásia	43	50	53	7083	7591	7973
China	183	320	319	9184	16219	15690
Europa	63	69	72	12802	14239	15416
Oriente Médio	2	2	2	180	180	190
América do Norte	26	25	27	5248	5041	5634
América do Sul	13	14	14	2770	3262	3292
TOTAL	334	484	491	37512	46777	48440

Segundo Brasil (2002) as taxas de crescimento da produção de painéis de fibra, no período entre 1961 e 2000, foram de 10,77 e 5,77% ao ano no Brasil e no mundo, respectivamente. Ainda, o autor cita que a produção brasileira de painéis de madeira tem como objetivo atender a demanda doméstica de consumo de painéis MDF.

2.9 Propriedades tecnológicas de painéis MDF de eucalipto

Na literatura especializada há indicação de raros trabalhos científicos referentes à utilização da madeira de eucalipto, como matéria prima na confecção de chapas MDF devido, possivelmente, ao histórico de utilização de coníferas na confecção deste tipo de painel.

Benaduce (1998) determinou em painéis MDF confeccionados com 100% de madeira de *E. grandis*, utilizando dosagens de resina uréica de 8-10-12%, valores de resistência à tração perpendicular de 0,45-0,74-1,13 N/mm², respectivamente, valores satisfatórios apenas para os painéis confeccionados com dosagem de 10 e 12%.

Na confecção laboratorial de chapas MDF de madeira de *Eucalyptus saligna* com 19 mm de espessura, 11% de resina uréica formaldeído e 1,5% de emulsão de parafina, Krzysik et al. (2001) obtiveram valores satisfatórios de MOR, MOE, resistência à tração perpendicular e de inchamento, em 42,2- 4420-0,66 N/mm² e 3%, respectivamente.

Em painéis MDF de madeira de *E. grandis*, Larh e Campos (2004) determinaram valores de resistência à tração perpendicular de 0,68-0,82-0,84 N/mm² para painéis com dosagens de resina uréica formaldeído de 8,0-10,0-12,0%, respectivamente, valores estes acima do mínimo especificado em 0,55 N/mm² (NBR 15316, 2006).

Riedl et al. verificaram nos testes de qualidade de chapas MDF de madeira de *Eucalyptus sp*, aglutinadas com resina uréica-formaldeído, resultados satisfatórios para resistência à tração perpendicular (0,75 N/mm²) e inchamento (10%).

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Espécie – origem, idade, transporte e armazenamento das toras

No presente trabalho foi utilizado madeira de plantações de *Eucalyptus grandis*, oriunda de plantios com 6,9 anos de idade, em 1ª rotação, no espaçamento de 3,0 x 1,5 m. Os plantios foram estabelecidos nas Fazendas Água Bonita (quadra 42) e Rio Claro (quadra 13), localizadas nos municípios de Botucatu e de Lençóis Paulista, SP, de propriedade da empresa Duratex S.A. As árvores dos referentes plantios são oriundas de material genético seminal proveniente de pomar de sementes clonal. O solo da Fazenda Água Bonita é caracterizado como areia quartzosa álica e latossolo vermelho-amarelo álico e o da Fazenda Rio Claro como latossolo vermelho-escuro álico. As toras de madeira coletadas a partir das árvores descritas apresentavam-se com 6,0 m de comprimento médio e 25 dias após corte foram transportadas para o pátio da planta de fabricação de painéis MDF da empresa localizado no município de Botucatu – SP.

3.2 Fluxograma com etapas do processo produtivo do painel MDF

A Figura 3 apresenta as várias etapas do processo produtivo industrial de um painel MDF sob a forma de fluxograma. Através deste fluxograma são indicados os locais de coleta de amostras dos diferentes materiais destinados ao presente estudo, conforme apresentado a seguir:

Local 1: coleta dos cavacos de madeira de eucalipto, localizada após a peneira de classificação e antes do lavador de cavacos;

Local 2: coleta dos componentes celulares desfibrados de madeira de eucalipto, localizada após a etapa formadora;

Local 3: coleta dos painéis MDF, localizada após prensa.

As coletas dos diferentes materiais, no fluxo de produção, foram realizadas de forma contínua e seqüencial assegurando que as amostragens realizadas representassem desde a matéria prima inicial (cavacos), após o desfibramento (massa desfibrada – coletada 15 minutos após a amostragem dos cavacos) e, finalmente, após a prensagem (painéis MDF, coletados 5 minutos após a amostragem da massa desfibrada).

Nas coletas para os tratamentos foram retiradas 6 sub-amostras de material, nomeadas de 1 a 6. As possíveis interferências nas transições entre as condições de tratamento dos cavacos foram evitadas pela utilização das sub-amostras nomeadas de 2 a 4 nas avaliações de caracterização anatômica dos componentes celulares e nos ensaios de qualidade tecnológica dos painéis MDF.

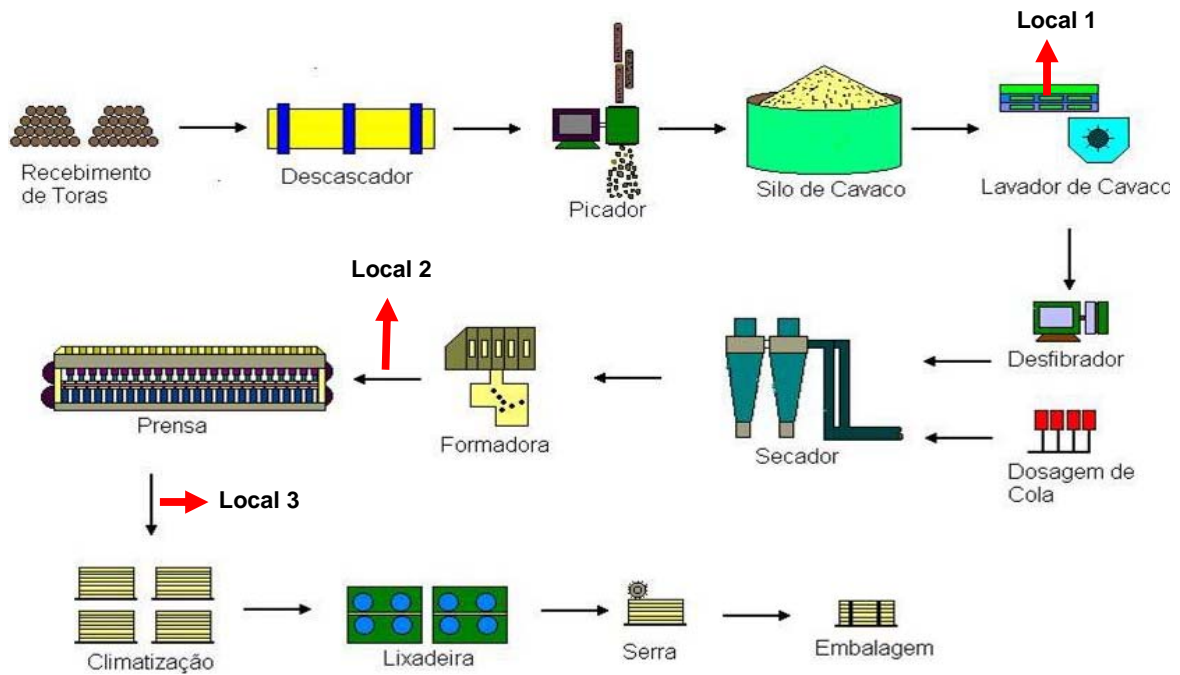


Figura 3 - Fluxograma ilustrativo com as etapas do processo de confecção de painéis MDF

3.3 Componentes fibrosos avaliados e análises laboratoriais realizadas

Os três materiais fibrosos - cavacos de madeira, polpas desfibradas em três condições diferenciadas (A, B, C) e painéis finais de linha de produção e em planta laboratorial – foram analisados em laboratório, quanto aos parâmetros anatômicos, físicos e mecânicos (Figura 4), e comparados estatisticamente através de delineamento inteiramente aleatorizado. Nos itens correspondentes do presente capítulo são apresentados os detalhamentos metodológicos dos tratamentos e das análises realizadas.

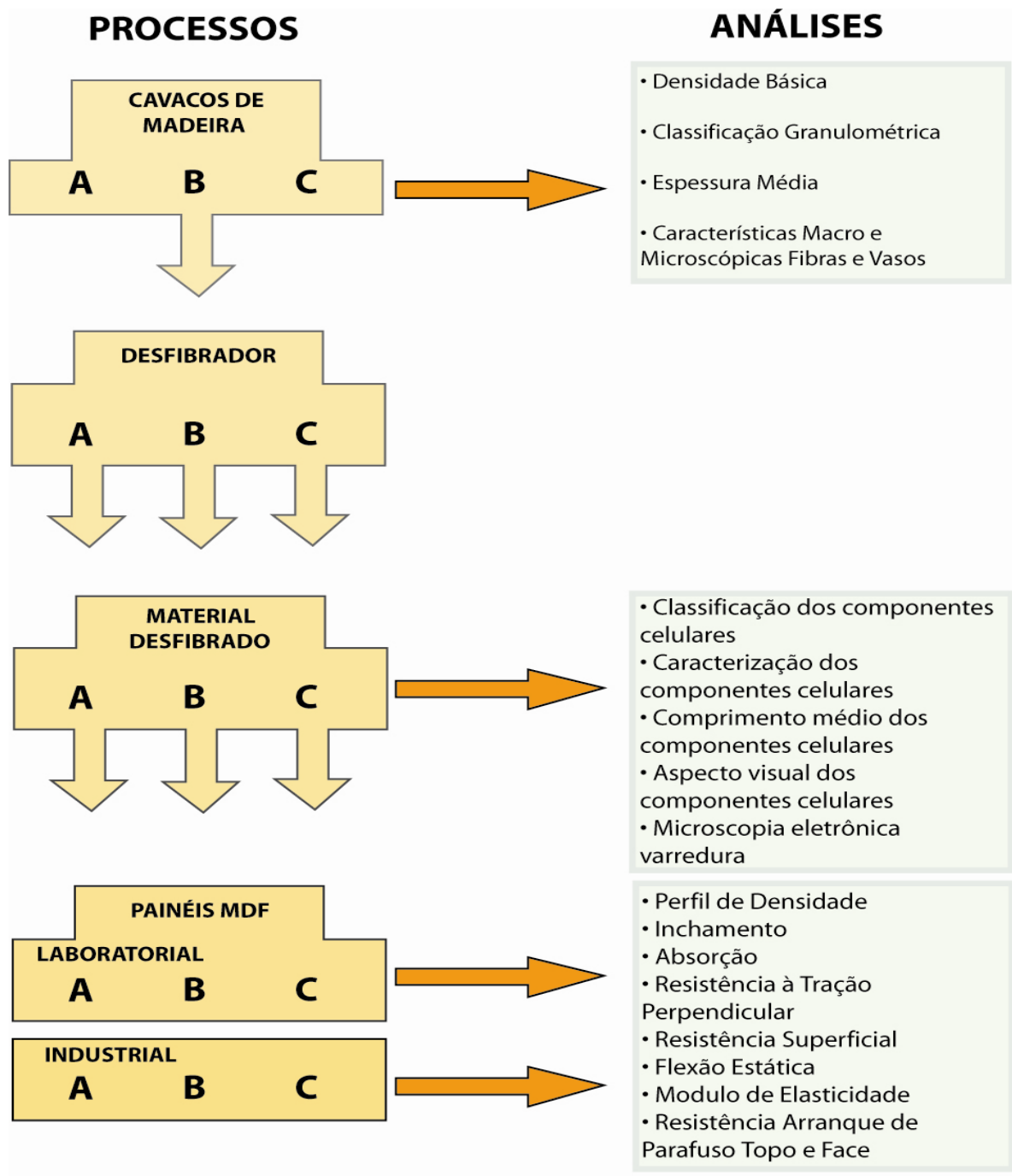


Figura 4 - Componentes de processo avaliados e análises realizadas

3.4 Cavacos de madeira de eucalipto

3.4.1 Obtenção dos cavacos de madeira de eucalipto no picador

As toras de madeira de eucalipto destinadas ao presente estudo, logo após chegadas do campo, foram inicialmente armazenadas no pátio de estocagem por um período de 2 dias. Posteriormente foram processadas integralmente para transformação em cavacos, sem a retirada das cascas; portanto as mesmas foram alimentadas após o descascador. Os cavacos de madeira de eucalipto foram depositados no silo de cavacos, alimentando a linha produtiva da fábrica, conforme seqüência ilustrada na Figura 5. No desenvolvimento do presente estudo, foi mantido volume mínimo de cavacos de madeira no silo de estocagem assegurando que a matéria prima após processada em cavacos (item 4.2) fosse imediatamente consumida na linha de produção, seguindo-se as etapas de classificação e de desfibramento dos cavacos.

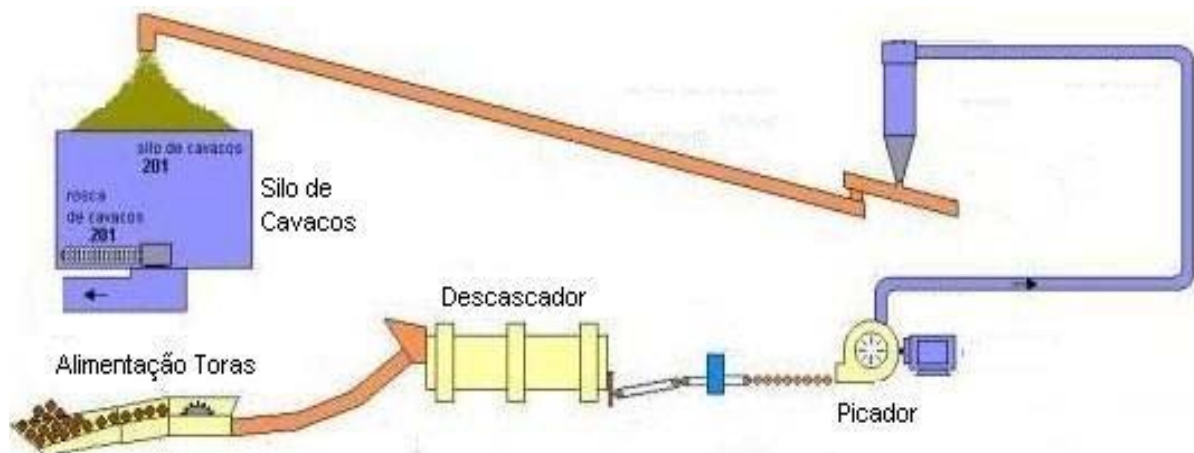


Figura 5 - Fluxograma ilustrativo da conversão das toras em cavacos de eucalipto

3.4.2 Coleta das amostras de cavacos de madeira

Logo após a operação de transformação das toras de eucalipto em cavacos de madeira segue-se a sua separação em peneira classificatória de dois estágios, o primeiro com uma malha superior (40,0 mm de abertura) para a retenção dos cavacos de madeira espessos e a segunda, uma malha inferior (3,0 mm de abertura) para a retenção dos cavacos com as dimensões ideais que seguem no processo industrial, possibilitando a passagem de cavacos finos. Os cavacos de madeira espessos são reprocessados (repicados) para menores dimensões e retornam à peneira classificatória,

e os finos destinados como biomassa suprindo as necessidades da unidade como fonte de energia. No fluxo de processo foram realizadas as coletas das amostras dos cavacos de madeira de dimensões ideais, retidos na segunda malha de peneiras.

Para cada pré-condição de desfibramento foram coletadas sub-amostras de 3,0 kg de cavacos de madeira, em intervalos de 15 min, perfazendo um total de 6 sub-amostras (identificadas como 1 a 6); no período completo de amostragem de 90 min foram coletados 18 kg de cavacos de madeira na linha de produção para cada pré-condição de desfibramento (identificadas como A, B e C). Após as coletas, os cavacos de madeira foram armazenados em embalagens plásticas, que foram mantidas abertas para evitar a incidência de fungos manchadores / emboloradores.

3.4.3 Avaliação dos cavacos de madeira

A avaliação dos cavacos de madeira de eucalipto visou à determinação de sua propriedade física (densidade básica) e a caracterização dimensional (classificação granulométrica e espessura) e anatômica microscópica (elementos de vaso e fibras).

3.4.3.1 Densidade básica: para determinação da densidade básica foram coletados 200 g de cavacos de madeira, de forma aleatória, para cada uma das seis sub-amostras, referentes as 3 pré-condições de desfibramento, com um total de 36 determinações (12 para cada pré-condição). Cada 200 g de cavacos continham cerca de 20 cavacos, portanto, para cada condição, a densidade básica foi determinada avaliando-se cerca de 440 cavacos, totalizando 1320 cavacos avaliados para as três pré-condições.

Os cavacos de madeira contidos em rede de fios de nylon foram imersos em água até a saturação completa. Em seguida, removeu-se o excesso de água da superfície dos cavacos determinando-se a massa total (cavacos de madeira + água) e, na seqüência, a sua massa absolutamente seca (secagem em estufa 105 ± 3 °C). Na determinação da densidade básica dos cavacos de madeira pelo método de Maximo Teor de Umidade (MTU) (Smith, 1954) aplicou-se a fórmula da eq. (1):

$$Db = \frac{1}{\frac{Pt}{Ps} - 0,346} \quad (1)$$

Onde: Db = densidade básica (g/cm³ ou kg/m³):

Pt = massa saturada em água (g);

Ps = massa seca (g).

0,346 = constante.

3.4.3.2 Classificação granulométrica dos cavacos (% retenção): a classificação granulométrica dos cavacos foi realizada em peneira vibratória com malhas de aberturas decrescentes de 40-25-16-8-3,35 mm e fundos, adotando-se o seguinte procedimento (a) montagem das peneiras, com a de maior abertura de malha na parte superior do aparelho; (b) adição um volume de cavacos de madeira até 1 cm abaixo da borda da peneira superior, evitando o contato com a tampa, (c) acoplamento das peneiras no aparelho de peneiramento e seu funcionamento (nível de vibração: 10; tempo: 10 min) e (d) pesagem das diferentes frações de cavacos de madeira e determinação da % de retenção. Para cada uma das 6 sub-amostras de cavacos de madeira, referentes as 3 pré-condições de desfibramento, foram feitas as respectivas classificações granulométricas, em um total de 18 análises.

3.4.3.3 Determinação da espessura média dos cavacos (mm): para a medição da espessura dos cavacos de madeira foram coletados 100 cavacos/peneira vibratória, em relação ao percentual de cavacos retidos na classificação granulométrica (item 4.4.3.2). Por exemplo, se na peneira de 16 mm foi de 42% a retenção dos cavacos de madeira, para a 1^a sub-amostra da pré-condição de desfibramento A, foram coletados aleatoriamente 42 cavacos, seguindo-se o mesmo procedimento para as demais peneiras. Foram mensuradas a espessura de 100 cavacos de madeira/amostra para cada uma das 3 pré-condições de desfibramento, com um total de 600 cavacos/pré-condição de desfibramento ou 1800 cavacos mensurados neste trabalho. A medição da espessura do cavaco de madeira foi feita com micrômetro na sua posição central.

3.4.3.4 Caracterização microscópica dos elementos de vaso: para a caracterização microscópica dos elementos de vaso, foram coletados 6 cavacos de madeira de eucalipto para cada das sub-amostras 2, 3 e 4, em cada umas das 3 pré-condições de desfibramento, totalizando 54 cavacos. Os cavacos de madeira foram cortados no plano transversal e preparadas lâminas histológicas semi-permanentes de acordo com Johansen (1940 e Sass (1951). Os corpos de prova de madeira (cavacos) foram mantidos em água a ebulição (1h), fixados em micrótomo de deslize e obtidos cortes histológicos transversais (12-14 μm de espessura). Os cortes histológicos do lenho foram (i) clarificados com hipoclorito de sódio + água destilada (1:1); (ii) lavados em água destilada; (iii) corados com verde iodo 1% por 3 min. (reação com a lignina); (iv) lavados duas vezes com água destilada; (v) corados com vermelho congo por 1 min. (reação com a celulose) (vi) selecionados e montados em lâmina de vidro com gelatina glicerizada.

Para cada seção transversal dos cavacos de madeira coletou-se 1 imagem digital da seção transversal do lenho com microscópio de luz acoplado a câmera CCD (25x ampliação) determinando o número total, freqüência, diâmetro tangencial, % de área ocupada pelos vasos e área total da imagem (Figura 6 A,B), aplicando-se o programa de análise de imagem SAIM concebido por Ribeiro (2002) e as fórmulas das eq. 2 e 3.

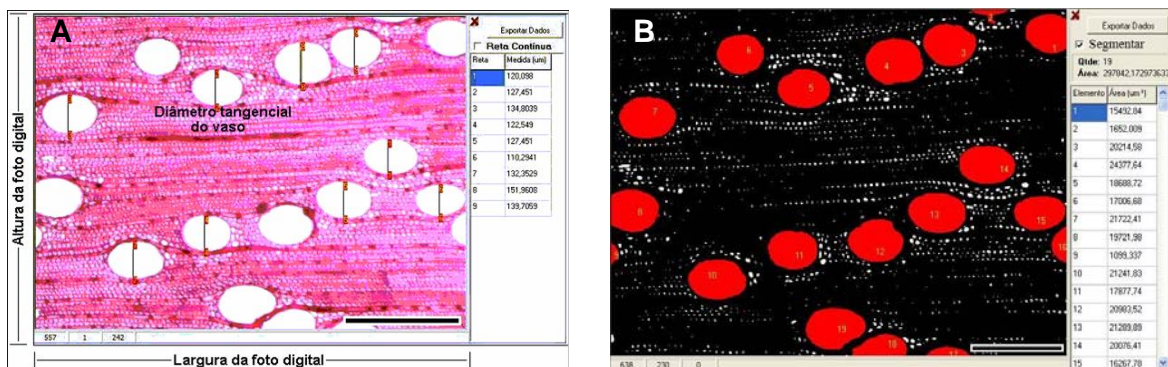


Figura 6 – Seção transversal do lenho de cavaco de madeira de eucalipto. **A**- determinação do número total e do diâmetro tangencial dos vasos; **B**- determinação da área ocupada pelos vasos. Barra = 300 μm

$$\text{Porcentagem de vasos} = \frac{\text{Área total de poros}}{(\text{Largura} * \text{altura})_{\text{da foto digital}}} * 100 \quad (2)$$

$$\text{Frequência de vasos}_{(\text{vasos/mm}^2)} = \frac{\text{Quantidade de vasos}}{(\text{Largura} * \text{altura})_{\text{da foto digital}}} \quad (3)$$

3.4.3.5 Caracterização das dimensões das fibras: para caracterização das fibras foi coletado 1 cavaco de madeira de eucalipto para cada uma das amostras 2, 3, 4 e 5, em cada uma das condições de desfibramento, totalizando 4 cavacos por condição e 12 cavacos no total. A dissociação ou maceração dos elementos anatômicos dos cavacos de madeira foi realizada através do método de Franklin, descrito em Johansen (1940) e Sass (1951), consistindo das seguintes etapas: (i) retirada de finas lascas do cavaco de madeira; (ii) transferência para tubos de ensaio com água destilada; (iii) substituição da água pela solução macerante (ácido acético glacial e água oxigenada 120 vol, 1:1), (iv) transferência dos tubos perfeitamente fechados para estufa a 60°C, 24 h; (v) remoção da solução macerante e lavagem do material macerado com água e (vi) coloração da suspensão de células do lenho. Para mensuração das dimensões das fibras, lâminas de vidro com as células do lenho foram examinadas em microscópio de luz e coletadas imagens das fibras através de câmara digital CCD para a mensuração de seu comprimento (ampliação de 25x), largura e diâmetro do lume (ampliação de 400x). Foram mensuradas 33 fibras para comprimento (Figura 7A) e 25 fibras para a largura e diâmetro do lume (Figuras 7B, C) conforme as normas da IAWA (IAWA-Committee, 1989). Portanto, para cada pré - condição de desfibramento foram mensuradas 132 fibras para comprimento (4 repetições) e 100 fibras para largura e diâmetro do lume (4 repetições), totalizando 396 fibras para comprimento e 300 fibras para diâmetro e comprimento do lume (considerando 3 condições). Para o cálculo da espessura da parede da fibra utilizou-se a fórmula da eq. 4:

$$Ep = \frac{Lg - Dl}{2} \quad (4)$$

Onde: Ep: espessura da parede da fibra (µm)

Lg: largura da fibra (µm)

Dl: diâmetro do lume da fibra (µm)

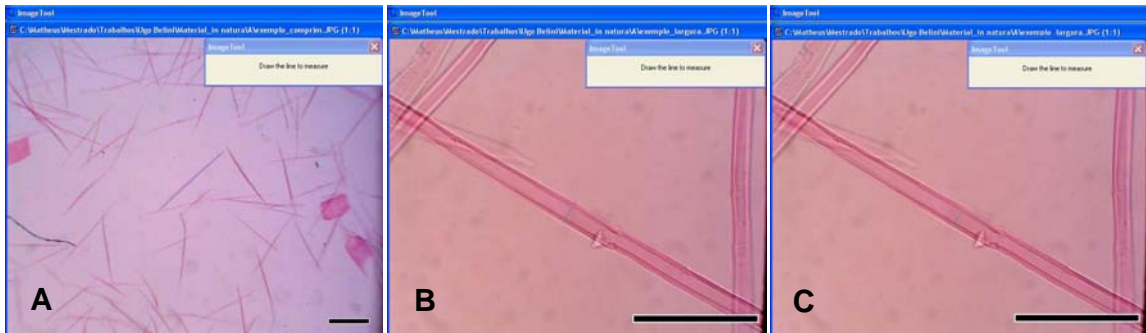


Figura 7 - Avaliação das dimensões das fibras do lenho de cavaco de madeira de eucalipto - **A** – comprimento (barra: 500 µm), **B** – largura e **C** – diâmetro do lume (barra: 100 µm)

3.4.3.6 Exame dos elementos celulares após a maceração, sob microscopia eletrônica de varredura (MEV): amostras de suspensão de células do lenho dos cavacos de madeira procedentes das 3 pré - condições de desfibramento foram coletadas para exame em microscópio eletrônico de varredura (MEV). O material dissociado foi disposto em placa de Petri e seco em condições laboratoriais. Posteriormente, houve a deposição de pequena fração sobre suporte metálico procedendo-se processo de metalização para evitar que os elétrons incidentes fossem absorvidos pela amostra (Kitajima et al., 1999). Em seguida, introduzido em câmara de espécime sob vácuo para coleta de imagens em microscópio eletrônico de varredura marca Zeiss modelo DSM 940 A, do Núcleo de Apoio a Pesquisa em Microscopia Eletrônica da ESALQ/USP.

3.5 Desfibramento dos cavacos de madeira de eucalipto

3.5.1 Condições de desfibramento dos cavacos de madeira

As condições de desfibramento dos cavacos de madeira de eucalipto avaliadas (denominadas A, B e C) variaram o (i) tempo de pré-quecimento dos cavacos (TPA) (em min), (ii) pressão na coluna de desfibramento (Pdesf.) (em bar), (iii) pressão na caixa de discos (Pcx. discos) (em bar) e (iv) energia específica de desfibramento (Energia Desf.) (em kwh/t) de acordo com a Tabela 5.

As condições estabelecem diferentes intensidades de refinação dos cavacos de madeira de eucalipto, sendo que a **condição A** estabelece parâmetros intermediários de intensidade de desfibramento, na **condição B** os parâmetros de desfibramento são

menos críticos aos elementos celulares dos cavacos de madeira durante etapa de desfibramento; na **condição C** esses parâmetros operaram em valores mais críticos aos elementos celulares (alto tempo de aquecimento dos cavacos de madeira, maiores pressões de digestão e de desfibramento, aumento da energia aplicada dos segmentos de disco ou menor abertura entre eles). Cada condição de desfibramento foi aplicada por um período de 90 min em linha de produção dos painéis MDF de eucalipto. As demais condições relevantes na fabricação dos painéis MDF, como a velocidade da linha e a dosagem dos aditivos, foram mantidas inalteradas.

Tabela 5 - Caracterização das variáveis de desfibramento dos cavacos de madeira de eucalipto, nas condições de produção de painéis MDF

Condições de desfibração	TPA (min)	P. desf. (bar)	P. cx. disco (bar)	Energia Desf. (kwh/t)
A	4,0	8,0	8,2	100
B	3,0	7,0	7,2	90
C	5,0	9,0	9,2	110

3.5.2 Coleta do material desfibrado dos cavacos de madeira

Os componentes celulares dos cavacos de madeira resultantes dos 3 processos de desfibramento foram denominados “fibras”, entendendo-se da existência de fragmentos de vasos e de parênquimas radial e longitudinal.

A coleta das amostras de “fibras” foi realizada na esteira de formação do colchão, de forma aleatória e no sentido do fluxo de produção, 15 minutos após a coleta dos cavacos de madeira. Nesta etapa do processo de produção dos painéis MDF ocorreu o desfibramento dos cavacos de madeira, a encolagem, secagem e a classificação do material desfibrado (“fibras”). Em cada condição de desfibramento dos cavacos de madeira foram coletadas 6 sub-amostras de 300 g de “fibras”, a intervalos de 15 min, em um período total de 90 min., em um total de 1,8 kg de “fibras”/condição de desfibramento. As sub-amostras de “fibras” foram devidamente acondicionadas em embalagens plásticas hermeticamente fechadas e identificadas com a condição de desfibramento (A, B e C) e o número da sub-amostra (1 a 6).

3.5.3 Insumos utilizados na confecção dos painéis MDF de madeira de eucalipto

3.5.3.1 Resina: a resina utilizada para a aglutinação das “fibras” foi base uréia formaldeído (RUF) na dosagem de 11,0 % (sólidos resina/fibra seca), cujas características são descritas na Tabela 6. A dosagem da resina foi mantida inalterada durante todo o ensaio, evitando sua influência nas variações das propriedades tecnológicas dos painéis MDF.

Tabela 6 - Características da resina uréia formol utilizada no experimento

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

3.5.3.2 Emulsão de parafina: foi utilizada uma emulsão de parafina comercial na dosagem de 0,37% (sólidos emulsão/fibra seca), com as características descritas na Tabela 7. A dosagem da foi mantida, da mesma forma, inalterada durante o experimento.

Tabela 7 - Características da emulsão de parafina utilizada no experimento

Variáveis	Unidade	Valores
Viscosidade CF 4	s	30
pH	--	10
Teor de sólidos	%	70

3.5.3.3 Catalisador: foi utilizado como catalisador (ou endurecedor) o sulfato de amônia técnico na dosagem de 0,8% sobre a resina e teor de sólidos de 7,5%, para reduzir o tempo de cura da resina uréia-formaldeído.

3.5.4 Avaliação dos componentes celulares após o desfibramento dos cavacos de madeira

3.5.4.1 Classificação dos componentes celulares: para cada amostra das “fibras” (1-6) de cada condição de desfibramento foram retirados 10 g de fibras após homogeneização do material, em um total de 18 amostras, para a sua classificação morfológica via úmido. Esta foi realizada acordo com metodologia TAPPI (T 233) em equipamento Bauer McNett modelo 203-C e com peneiras de 20; 35; 65; 150 e >150 mesh. O número da peneira indica a quantidade de malhas/pol², ex.: na 20 existem 20 malhas/pol² com uma maior abertura entre as malhas maior do que na 35 (35 malhas/pol²): a de 20 retêm fibras com maiores dimensões (considerados “fiapos”) e na de 35 (e também 65, 150) as fibras de dimensões médias, até a >150 com as fibras “finas”. A massa de fibras das amostras é suspensa em água e adicionada ao sistema de circulação de água do equipamento que as transporta através do sistema de peneiras, determinando-se posteriormente a massa seca e o percentual de fibras retido em cada peneira.

3.5.4.2 Aspectos visuais dos componentes celulares: a morfologia dos componentes celulares dos cavacos de madeira, após o seu desfibramento nas 3 diferentes condições, foi analisada sob microscópio estereoscópico Olympus SZX 12 (35 X ampliação) e coletadas imagens fotográficas dos componentes celulares.

3.5.4.3 Caracterização microscópica dos componentes celulares: na caracterização microscópica dos componentes celulares procedeu-se nova classificação das “fibras” no equipamento Bauer McNett, coletando-se os materiais fibrosos retidos nas peneiras 20-35-65-150 mesh e acondicionando-os em frasco plástico (80 ml) com 1 ml de formol, sendo hermeticamente fechado. Foram coletadas 3 amostras por peneira (4 peneiras), para cada condição de desfibramento (3 condições), totalizando 36 amostras de material fibroso para a caracterização microscópica.

As amostras fibrosas foram transferidas para tubos de ensaio com água, coradas (safranina + glicerina) e montadas em lâminas de vidro. As células do lenho

foram observadas sob microscopia de luz e coletadas as imagens digitais. Foram mensurados os comprimentos (25 x, ampliação), largura, espessura da parede e diâmetro do lume (400x, ampliação) das fibras, de acordo com as normas da IAWA Committee, (1989). Para a mensuração do comprimento das fibras, por condição, foram avaliadas 99 fibras em cada peneira (33 x 3 repetições) ou 396 fibras (99 x 4 peneiras) em cada condição, totalizando 1188 fibras (396 x 3 condições). Para a mensuração da largura, espessura da parede e diâmetro do lume das fibras, por condição de desfibramento, foram avaliadas 75 fibras em cada peneira (25 x 3 repetições) ou 300 fibras (75 X 4 peneiras), totalizando 900 fibras (300 x 3 condições).

Além desses parâmetros estimaram-se, a partir de cada imagem digital para mensuração do comprimento das fibras, o número de feixes de fibras e o % de fibras quebradas, quantidade de elementos de vaso presentes e de células parênquimáticas, como subsídio para a avaliação dos parâmetros referentes às condições de desfibramento dos cavacos de madeira de eucalipto.

3.5.4.4 Comprimento médio dos componentes celulares: o comprimento médio ponderado dos componentes celulares é determinado por fórmula que utiliza a (i) % de massa seca de material fibroso retido nas peneiras do equipamento Bauer McNett (item 4.5.4.1) e (ii) fator numérico, em mm, para cada peneira, determinados pela empresa (Duratex, 1968), conforme eq. (5):

$$\text{CMF (mm): } (2,717 \times \%P20) + (1,062 \times \%P35) + (0,869 \times \%P65) + (0,616 \times \%P150) + (0,257 \times \%>P150) \quad (5)$$

Onde: CMF: comprimento médio dos componentes celulares (em mm).

Fatores de comprimento/peneira: 2,717....0,257 (em mm).

Peneiras do equipamento Bauer McNett: P20...>P150.

3.5.4.5 Exame dos componentes celulares após desfibramento sob de microscopia eletrônica de varredura (MEV): os componentes desfibrados da madeira das 3 condições de desfibramento, acondicionados em embalagens hermeticamente fechadas, foram examinados sob microscópio eletrônico de varredura

marca Zeiss modelo DSM 940 A. As imagens dos componentes celulares foram obtidas em 4 ampliações: 200, 500, 1000 e 2000x.

3.6 Confeção de painéis MDF de madeira de eucalipto

3.6.1 Confeção de painéis MDF em condições industriais

Para a confecção dos painéis MDF nas três condições de desfibramento dos cavacos de madeira de eucalipto foi utilizada prensa contínua marca Siempelkamp e modelo ContiRoll. O colchão de fibras já encolado e com a gramatura de fibras adequadas a densidade do painel foi introduzido nas placas metálicas da prensa e, sob condições de temperatura e pressão, a resina que envolve as fibras sofreu o processo de polimerização, consolidando os painéis MDF. O ciclo de prensagem dos painéis MDF utilizado foi similar ao do aplicado para os painéis MDF em escala laboratorial (descrito no item 4.6.2) diferenciando-se, somente, pelo gradiente de temperatura dos pratos da prensa, que se inicia em 205°C e finaliza em 175°C.

3.6.1.1 Coleta dos painéis MDF de eucalipto: para cada tratamento de desfibramento dos cavacos de madeira foram coletadas 12 amostras de painéis MDF na linha de produção (6 para análises e 6 como contra prova; total de 36 amostras) nas dimensões de 18,9 x 500 x 1830 mm, cerca de 5 min após a coleta das sub-amostras dos componentes celulares desfibrados (item 4.5).

3.6.2 Confeção dos painéis MDF em condições de laboratório

Na etapa da 3ª amostragem de material fibroso (metade do processo de produção das chapas nas 3 condições de desfibramento) foram coletados 15 kg de “fibras” para utilização na confecção de 6 chapas de painéis MDF, em condições laboratoriais, para cada condição de desfibramento, em um total de 18 painéis MDF, nas mesmas condições de prensagem. Essas chapas laboratoriais de painéis MDF foram confeccionadas imediatamente após coleta das “fibras” no fluxo produtivo, por já estarem encoladas e haver possibilidade de perda das características adesivas pelo processo de cura da resina e, conseqüente, perda de sua reatividade.

Uma amostra de 2,0 kg do lote de 15 kg de “fibras”/condição de desfibramento foi separada para a formação do colchão de fibras e posterior obtenção de painéis com a mesma espessura (18,9 mm) e densidade (690 kg/m³) dos painéis MDF da linha de produção. A massa de fibras foi disposta manualmente em uma caixa formadora apoiada em uma placa de alumínio, sendo aplicada uma pressão manual através do suporte de fechamento da caixa para a correta formação do colchão de fibras sendo, posteriormente, transportada a um sistema hidráulico de aplicação de pressão (20 s) necessária apenas para a retirada de ar do colchão.

Em seguida, o colchão de fibras foi prensado em prensa laboratorial marca Siempelkamp, com ciclo de prensagem programado e similar ao utilizado na linha de produção e composto por patamares de pressão e manutenção de um tempo em cada estágio, mantido inalterado durante a prensagem de todas as chapas MDF. O ciclo de prensagem utilizado foi 10 s para pressão de 0 a 100 N/cm², 5 s em 100 N/cm², 20 s para redução até 20 /cm², 15 s para redução até 10N/cm², pressão esta mantida por 65 s, aumento para 30 N/cm² e manutenção por 50 s e posterior redução para 0 em período de 5 s, com temperatura estável em 195°C durante a confecção das chapas. Após prensagem, as amostras de painéis MDF foram climatizadas a temperatura ambiente e refiladas lateralmente com dimensões finais de 18,9 x 380 x 380 mm.

3.6.3 Determinação das propriedades tecnológicas dos painéis MDF

As propriedades tecnológicas das amostras dos painéis MDF foram determinadas em equipamento de ensaios universal marca IMAL, na unidade de Botucatu da Duratex S.A, que possui controles de velocidade para o tracionamento e a compressão das amostras. Os ensaios de caracterização tecnológica dos painéis atenderam as normas ABNT NBR 15316-3 (2006) - Chapas de Fibra de Média Densidade – Parte 3: Métodos de Ensaio.

Para os painéis de linha industrial foram consideradas chapas obtidas das amostras 2, 3 e 4, sendo realizado 8 determinações por amostras para cada ensaio proposto, totalizando 24 determinações por condição/ensaio proposto ou um total de 72 determinações para as 3 condições. Para os painéis laboratoriais foram

consideradas chapas obtidas das amostras 2, 3, 4 e 5, sendo realizado 6 determinações por amostras para cada ensaio proposto, totalizando 24 determinações por condição/ensaio proposto ou um total de 72 determinações para as 3 condições. Todos os ensaios foram determinados com os corpos de prova climatizados. A Figura 8 ilustra os ensaios de qualidade tecnológica realizados, a saber:

Perfil de densidade - PERF: amostras de painéis MDF (50 x 50 mm) foram analisadas através da atenuação de raios gama determinando-se a sua densidade média e seu gradiente de variação ao longo da espessura.

Inchamento em espessura - INCH (%): amostras de painéis MDF (50 x 50 mm) são imersas em água (24 h; 20°C) avaliando-se o seu incremento em espessura.

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

Resistência à tração perpendicular ao plano - TRAÇ (N/mm²): amostras de painéis MDF (50 x 50 mm) são submetidas a força de tração aplicada perpendicularmente à sua superfície até a ruptura.

Resistência superficial - SUP (N/mm²): amostras de painéis MDF (50 x 50 mm) são submetidas à força de tração aplicada perpendicularmente ao plano de sua face, promovendo o arranque de determinada área da sua camada superficial.

Resistência à flexão estática – FLEXÃO (N/mm²): amostras de painéis MDF (50 x 410 mm) são submetidas à força aplicada em seu centro até a ruptura. Face limitação de comprimento das chapas laboratoriais – máximo 380 mm – nas avaliações de flexão dos CPs laboratoriais o apoio foi reduzido para 30 mm.

Módulo de elasticidade – MOE (N/mm²): amostras de painéis MDF (50 x 410 mm) são 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.

Resistência ao arranque de parafuso - PARAF (kgf): amostras de painéis MDF (50 x 70 mm) são submetidas ao arranque de parafuso na sua superfície ou topo, para verificação da resistência.

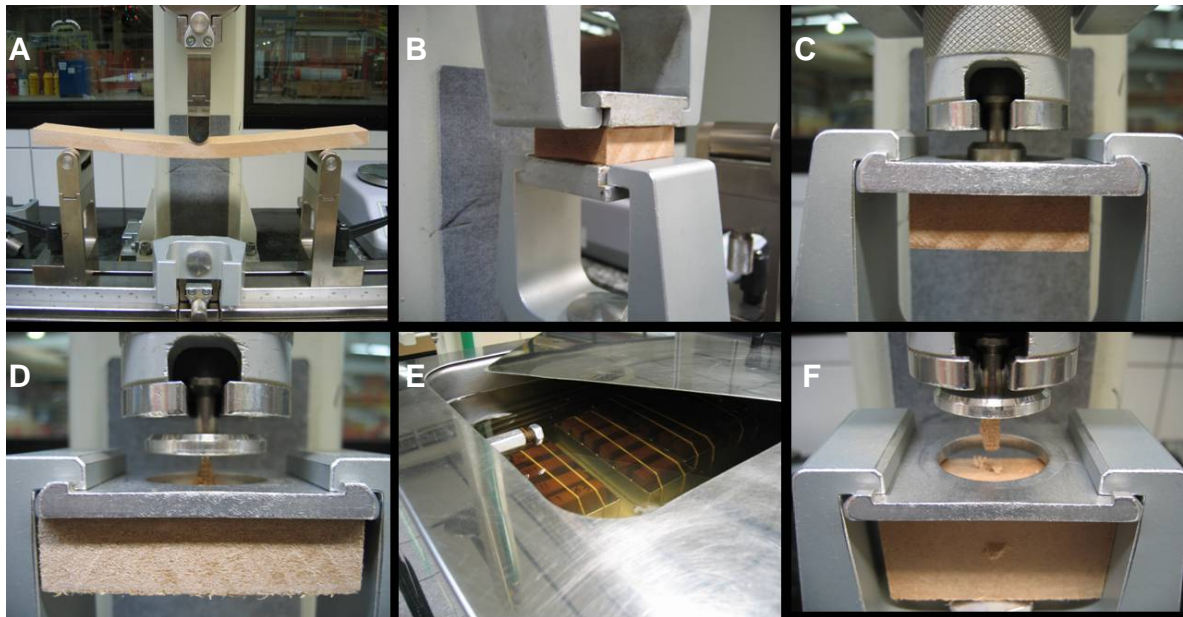


Figura 8 - Ensaio de qualidade tecnológica dos painéis MDF de eucalipto, nas 3 condições de desfibramento. **A** - módulo de ruptura e de elasticidade; **B** - resistência à tração perpendicular; **C** - resistência superficial; **D** - resistência ao arranque de parafuso face; **E** - ensaio de inchamento e absorção em banho termostatizado; **F** - resistência ao arranque de parafuso topo

A demarcação dos corpos de prova de chapas MDF foi feita de forma casualizada, abrangendo toda a área específica dos painéis MDF da linha de produção e laboratorial (Figuras 9-10). Os testes de qualidade tecnológica visaram caracterização física e mecânica dos painéis MDF, de acordo com a norma NBR 15316-3 (2006), bem como correlaciona-los com a morfologia dos componentes celulares dos painéis nas 3 condições de desfibramento, incluindo a análise visual comparativa das características aparentes. Os painéis MDF de eucalipto confeccionados no regime normal de produção foram comparados com os produzidos em planta piloto laboratorial quanto à caracterização dos componentes celulares e propriedades físicas e mecânicas (qualidade tecnológica).

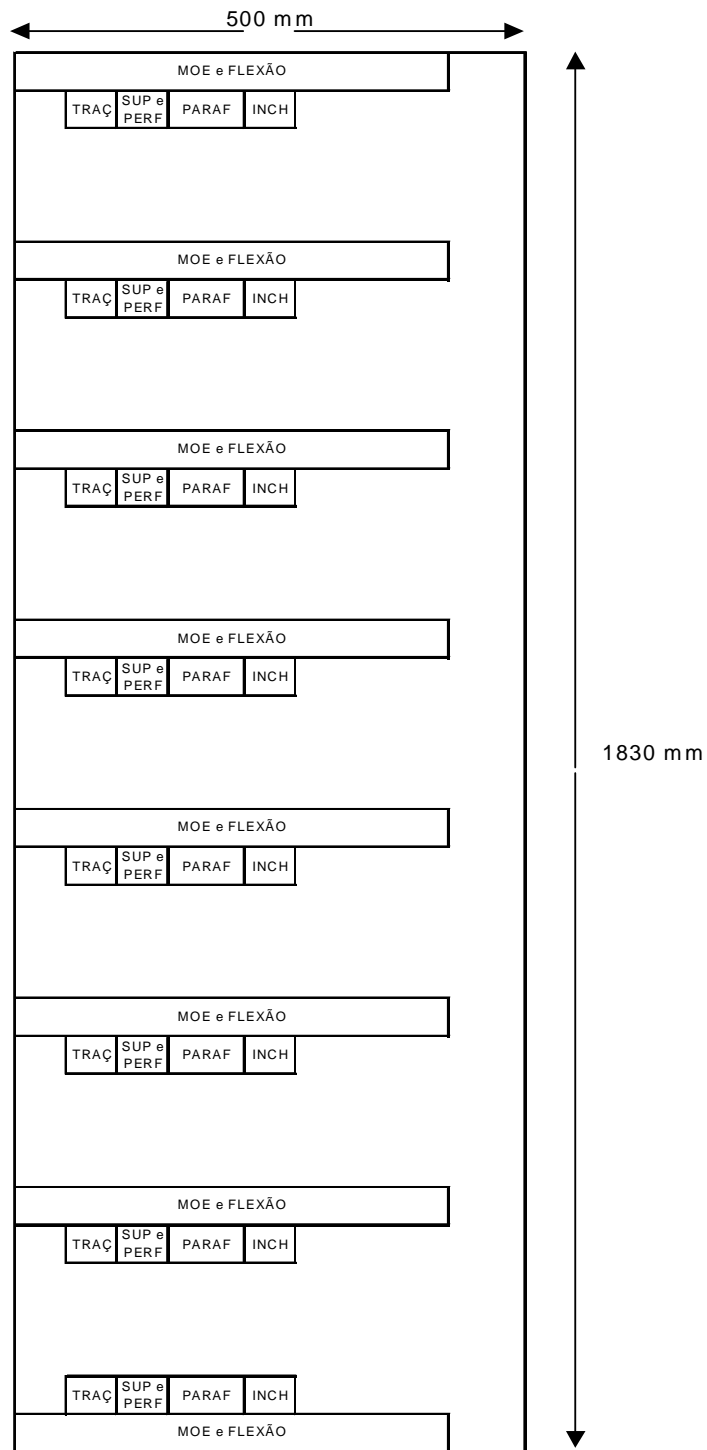


Figura 9 - Amostragem dos corpos de prova de painéis MDF de eucalipto produzidos em linha industrial, nas 3 condições de desfibramento, para os ensaios de qualidade tecnológica

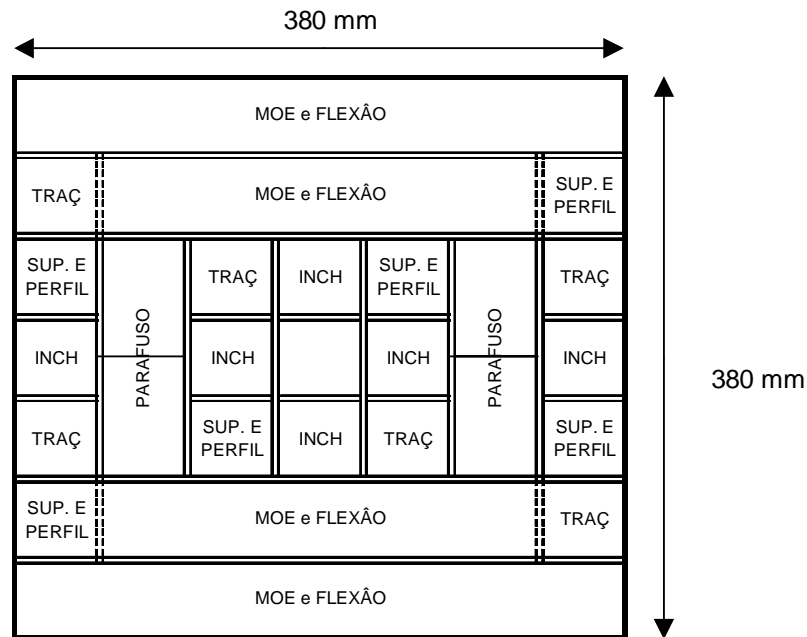


Figura 10 - Amostragem dos corpos de prova de painéis MDF de eucalipto produzidos em escala laboratorial, nas 3 condições de desfibramento, para os ensaios de qualidade tecnológica

3.6.4 Painéis MDF de linha de produção x painéis MDF de escala laboratorial

Na confecção de painéis MDF em escala laboratorial simulam-se as condições as condições do ciclo de prensagem, evitando a influência de fatores presentes na linha de produção industrial. Os resultados dos ensaios apresentados demonstram que os painéis MDF obtidos em escala laboratorial tiveram 3 tratamentos de refinação resultando em massas diferenciadas de componentes celulares da madeira dos cavacos de eucalipto. Essas 3 diferentes matérias primas para a confecção dos painéis MDF em laboratório foram coletadas diretamente na linha produtiva com controle automático da encolagem – recobrimento das fibras com o adesivo - considerada crucial para a avaliação da qualidade tecnológica dos painéis e de difícil execução em escala laboratorial, face necessidade de recobrimento das fibras com o adesivo. No entanto, os painéis MDF produzidos em condições de laboratório necessitam ser comparados quanto as suas propriedades tecnológicas com os confeccionados em produção piloto na linha produtiva, pela situação real das suas condições de fabricação.

3.6.5 Aspectos visuais dos componentes celulares no centro dos painéis

A morfologia e a coloração dos componentes celulares da região interna dos painéis MDF após o desfibramento nas 3 condições foram analisadas em microscópio estereoscópico Olympus SZX 12 (35 X ampliação) e coletadas as imagens fotográficas.

3.6.6 Exame da região central dos painéis MDF sob microscopia eletrônica de varredura (MEV)

A camada interna dos painéis MDF obtidos dos corpos de prova rompidos dos ensaios de resistência à tração perpendicular, por condição de desfibramento, foi analisada através de microscópio eletrônico de varredura marca Zeiss modelo DSM 940 A, obtendo-se as imagens com diferentes ampliações (200, 500, 1000, 2000 x) para a diferenciação e avaliação dos componentes celulares.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Avaliação dos cavacos de madeira

4.1.1 Densidade básica dos cavacos

Os valores de densidade básica dos cavacos de madeira das 6 sub-amostras coletadas na fase anterior a aplicação das 3 diferentes condições de desfibramento são apresentados na Tabela 8 e no Anexo A.

Os valores médios da densidade básica dos cavacos foram de 0,432, 0,432 e 0,433 g/cm³, nas condições prévias de desfibramento A, B e C, respectivamente.

Os valores de densidade básica dos cavacos de madeira não diferiram estatisticamente entre si e demonstram a homogeneidade do lote de cavacos armazenado no silo da unidade assegurando o suprimento de matéria-prima similar para as 3 condições de desfibramento e, posteriormente, na confecção dos painéis.

Tabela 8 - Densidade básica dos cavacos de madeira de eucalipto submetidos a 3 condições prévias de desfibramento

Pré-condição de desfibrção	Densidade básica (g/cm ³)
A	0,432 a (0,444 – 0,421) (0,01) (2,34)
B	0,432 a (0,436 – 0,424) (0,004) (0,98)
C	0,433 a (0,442 – 0,424) (0,008) (1,75)

Valores médios seguidos de (máxima; mínima) (desvio padrão) e (coeficiente de variação); letras iguais em uma mesma coluna mostram similaridade estatística ao nível de 5% de probabilidade (teste Tukey).

Os valores de densidade básica verificados foram inferiores ao determinado por Alzate (2004) em 0,46 g/cm³ para *E. grandis* aos 7 anos, possivelmente devido aos diferentes sítios de plantio e condições climáticas. Os valores do presente trabalho foram similares aos determinados por Tomazello Filho (1985a,b) para *E. grandis* e Tomazello Filho (2006) para *E. grandis x urophylla* com 7,1 anos, de 0,438 g/cm³. Para a produção de painéis MDF, o parâmetro densidade é importante pois está diretamente relacionado ao fator de conversão de m³ de madeira para m³ de MDF, onde a utilização de espécies com maior densidade resulta em menor consumo de madeira para uma mesma densidade final do painel.

4.1.2 Classificação granulométrica dos cavacos (% retenção)

Os valores em % de retenção dos cavacos de madeira de eucalipto nas 5 diferentes peneiras vibratórias e no recipiente final (fundo) são apresentados na Tabela 9, Figuras 11 e 12 e no Anexo B. Os valores de retenção dos cavacos de madeira para as 3 condições prévias de desfibramento demonstram, a exemplo da densidade básica, não haver diferenças estatísticas entre a morfologia dos cavacos utilizados durante as três pré-condições estabelecidas e são indicativos da homogeneidade do lote de cavacos existente no silo de armazenamento. Os valores médios de retenção de cavacos de madeira para as três condições de desfibramento foram de 0,9 – 16,9 – 44,5 – 30,7 – 6,1 – 0,9% nas peneiras de abertura 40, 25, 16, 8, 3,35 mm e fundo, respectivamente. Esses resultados demonstram que as maiores retenções ocorrem nas peneiras de abertura 25, 16 e 8 mm, representando 92,1% do total de cavacos retidos.

Tabela 9 - Percentual de retenção dos cavacos de madeira de eucalipto em peneira vibratória, por pré-condição de desfibramento

Pré - condição de desfibrção	Abertura da peneira (mm) / % retenção de cavacos de madeira					
	40	25	16	8	3,35	fundos
A	1,1 a (2,9-0) (1,1) (107,8)	18,1 a (23,4-12,0) (4,4) (24,4)	44,4 a (50,2-33,7) (6,5) (14,6)	29,3 a (31,8-27,8) (1,7) (5,8)	6,1 a (7,1-4,3) (0,9) (14,6)	0,9 a (0,7-0,9) (0,09) (10,4)
B	0,6 a (2,1-0) (0,8) (137,8)	15,6 a (17,3-13,8) (1,5) (9,6)	44,8 a (40,2-49,4) (3,6) (8,1)	32,2 a (36,1-28,1) (3,0) (9,2)	5,8 a (7,4-3,8) (1,3) (23,3)	0,9 a (1,2-0,7) (0,2) (21,5)
C	1,1 a (4,3-0) (1,8) (168,1)	14,2 a (15,8-10,2) (2,2) (15,6)	45,3 a (54,3-35,1) (7,2) (15,9)	31,5 a (39,9-25,2) (5,8) (18,5)	6,8 a (10,4-3,9) (2,8) (41,1)	1,1 a (2,2-0,5) (0,7) (58,7)

Valores médios seguidos de (máxima; mínima) (desvio padrão) e (coeficiente de variação); letras iguais em uma mesma coluna mostram similaridade estatística ao nível de 5% de probabilidade (teste Tukey).

A similaridade da morfologia dos cavacos de madeira de eucalipto (92.1% entre as peneiras 25-8 mm) é considerada uma importante variável no processo de fabricação de chapas MDF: na coluna pressurizada a etapa de aquecimento dos cavacos de madeira e a plasticização da lignina ocorrem de forma homogênea e, da mesma forma, na etapa seguinte, durante o desfibramento dos componentes celulares da madeira. O percentual de retenção de cavacos de madeira em cada peneira deve ser estipulado em função do desempenho no processo produtivo observando-se, muitas vezes, a necessidade de alterar os parâmetros de regulação do picador,

quando são elevados os percentuais de cavacos retidos nas peneiras extremas. Os cavacos de madeira de maiores dimensões (retidos na peneira de 40 mm) podem sofrer aquecimento parcial no período de permanência na coluna de aquecimento, gerando feixes de fibras após o desfibramento. Os cavacos de madeira de dimensões reduzidas (retidos na peneira 3,35 mm e fundos) pelo aquecimento excessivo no aquecimento adquirem coloração escura e prejudicam a qualidade aparente das chapas MDF. Portanto, os cavacos de madeira de maiores dimensões são reprocessados (repicados) e retornam ao fluxo de fabricação; os de menores dimensões são destinados a queima e a geração de energia.

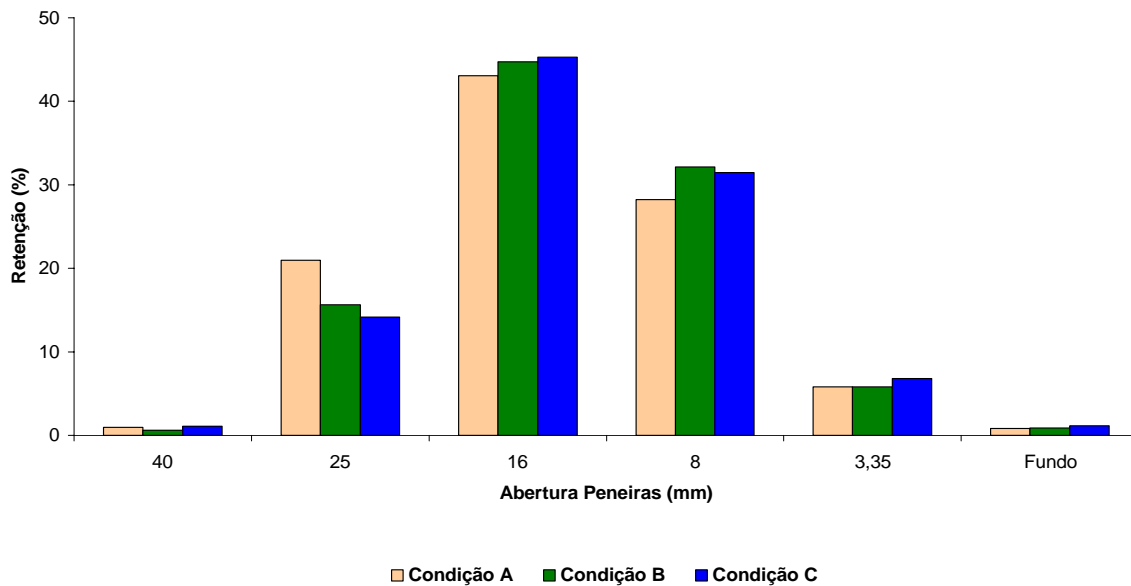


Figura 11 - Percentual de retenção dos cavacos de eucalipto em peneira vibratória, por pré-condição de desfibramento



Figura 12 - Ilustrativo da morfologia dos cavacos de madeira de eucalipto retidos nas peneiras classificatórias e no compartimento do fundo

4.1.3 Determinação da espessura média dos cavacos (mm)

Os valores de espessura média dos cavacos de madeira de eucalipto, nas 3 condições prévias de desfibramento, são apresentados na Tabela 10 e no Anexo C. Os valores médios da espessura dos cavacos de madeira foram de 4,47, 4,31 e 4,30 mm, para as pré-condições de desfibramento A, B e C. Esses valores indicam não haver significância estatística para esse parâmetro de qualidade dos cavacos de madeira demonstrando, a exemplo dos anteriores (densidade básica, % de retenção), o lote homogêneo de cavacos de madeira no silo. Essas condições asseguram avaliar isoladamente o efeito dos 3 tratamentos de desfibramento na morfologia dos componentes anatômicos e nas propriedades tecnológicas dos painéis MDF.

Tabela 10 - Espessura (mm) dos cavacos utilizados, por amostra e pré-condição de desfibramento

Pré - condição de desfibração	Espessura do cavaco de madeira (mm)
A	4,40 a (4,16 - 4,57) (0,17) (3,9)
B	4,31 a (3,93 - 4,49) (0,22) (5,1)
C	4,30 a (3,90 - 4,64) (0,29) (6,7)

Valores médios seguidos de (máxima; mínima) (desvio padrão) e (coeficiente de variação); letras iguais em uma mesma coluna mostram similaridade estatística ao nível de 5% de probabilidade (teste Tukey).

A espessura dos cavacos de madeira pode ser considerada o parâmetro de qualidade mais relevante na confecção dos painéis MDF: está relacionada com o processo de transferência de calor para o interior do cavaco no período de sua permanência na coluna pressurizada de aquecimento. Cavacos de madeira com espessura acima de 5,0mm (por ex.) não são completa e homogeneamente aquecidos, com deficiência no processo plasticização (ou amolecimento) da lignina e do desfibramento acarretando a geração de feixes de fibras (vide item 4.1.2). Os valores de espessura de 3,5-4,5 mm podem ser considerados usuais no processo termo-mecânico de produção de painéis MDF. Por outro lado, a espessura dos cavacos de madeira deve ser ajustada em função da qualidade do produto final e das características da planta produtiva.

4.1.4 Caracterização microscópica dos elementos de vaso

Os valores dimensionais dos elementos de vaso da madeira dos cavacos de eucalipto coletados nas 3 pré-condições de desfibramento são apresentados na Tabela 11. Através desta Tabela é possível verificar que não houve diferença estatística significativa para os valores médios de frequência, diâmetro e % de vasos entre as 3 pré - condições, corroborando as análises anteriores (itens 4.1.1-.2-.3). Os valores médios de frequência, diâmetro e % de vasos para as três pré-condições de desfibramento foram de 11,8, 105,4 e 10,3, respectivamente.

Tabela 11 - Frequência, diâmetro e % dos elementos de vaso nos cavacos de madeira de eucalipto, nas 3 pré - condições de desfibramento

Pré - condição de desfibrção	Elementos de vaso		
	Frequência (n ^o /mm ²)	Diâmetro tangencial (µm)	% de área (%)
A	12,3 a (16,2 ; 8,9) (1,65) (13,44)	102,9 a (116,3 ; 88,4) (7,49) (7,28)	10,2 a (13,2 ; 7,5) (1,55) (15,21)
B	11,2 a (13,0 ; 8,1) (1,57) (14,02)	107,6 a (120,7 ; 96,9) (6,5) (6,04)	10,2 a (12,9 ; 7,2) (1,57) (15,43)
C	11,9 a (16,2 ; 9,7) (1,55) (13,01)	105,7 a (117,1 ; 91,8) (6,5) (6,15)	10,5 a (15,4 ; 8,1) (1,75) (16,70)

Valores médios seguidos de (máxima; mínima) (desvio padrão) e (coeficiente de variação); letras iguais em uma mesma coluna mostram similaridade estatística ao nível de 5% de probabilidade (teste Tukey).

Os elementos de vaso desempenham no lenho funcional das árvores (alburno) a função de condução de seiva mineral das raízes até a copa das árvores; nos cavacos de madeira são elementos anatômicos importantes na difusão do vapor de água no processo de aquecimento, anterior a etapa de desfibramento.

Na madeira de *Eucalyptus grandis* com 16 anos, Oliveira (1997) determinou a frequência de 18, 10, 13 e 11 vasos/mm² nas regiões próxima à medula, a 1/3, a 2/3 e na região periférica do tronco, respectivamente, demonstrando a existência de variação radial. Alzate (2004) verificou frequência e diâmetro de vasos entre 9-14 / mm² e de 106 µm, respectivamente, para clones de *Eucalyptus grandis*. A 100% da altura de árvores de *E. grandis*, de 7 anos, Rocha et al. (2004) determinaram 12,4-17,4 vasos/mm², com o diâmetro de 90,1-105,6 µm. Os resultados apresentados na literatura para os valores de vasos em madeira de árvores de eucalipto, cultivadas em diferentes regiões, corroboram os obtidos no presente trabalho.

4.1.5 Caracterização dos componentes celulares dos cavacos

Os valores das dimensões das fibras dos cavacos de madeira de eucalipto indicaram através da análise estatística similaridade da sua estrutura anatômica, da mesma forma do que o observado para os parâmetros analisados anteriormente. Os valores médios do comprimento, largura, diâmetro do lume e da espessura da parede das fibras foram de 1005-19,7-11,8-3,9 µm, respectivamente, com valores por pré-condição citados na Tabela 12. Assim, a etapa de transformação das toras de eucalipto em cavacos de madeira e seu armazenamento no silo promoveu sua homogeneização resultando, conforme discutido, em segura avaliação dos tratamentos de desfibramento. A espessura da parede das fibras na pré-condição de desfibramento C mostrou diferença estatística para com as demais, mesmo sendo um parâmetro obtido a partir da largura e espessura do lume (parâmetros não significativos), devendo ser considerado como um efeito fortuito.

Tabela 12 - Comprimento, largura, diâmetro do lume e espessura da parede das fibras da madeira dos cavacos de eucalipto, utilizados nas 3 pré-condições de desfibramento

Condição de desfibrção	Dimensões das fibras (μm)			
	Comprimento	Largura	Diâmetro lume	Espessura parede
A	1002 a (1240-820) (1,08) (0,11)	19,37 a (23,24-16,19) (0,37) (1,89)	11,66 a (15,61-8,87) (0,82) (7,03)	3,86 a (5,72-2,43) (0,34) (8,86)
B	1006 a (1252-822) (3,74) (0,37)	19,94 a (23,64-16,57) (0,73) (3,65)	12,27 a (15,74-9,03) (0,17) (1,37)	3,83 a (4,96-2,79) (0,32) (8,33)
C	1008 a (1174-837) (1,48) (0,15)	19,99 a (23,05-15,45) (0,93) (4,65)	11,71 a (15,37-7,61) (0,95) (8,15)	4,14 b (5,89-2,63) (0,12) (2,96)

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

Em árvores de *Eucalyptus grandis* x *urophylla* com 7,1 anos, Tomazello Filho (2006) determinou fibras com largura de 17,47-19,88 μm , diâmetro do lume de 7,98-12,96 μm , espessura da parede de 3,07-4,94 μm e comprimento de 659,8-1174 μm no sentido radial das amostras do lenho em três tratamentos. Na caracterização anatômica da madeira de clones de *Eucalyptus grandis* com 7 anos, Alzate (2004) verificou comprimento de 670-1230 μm , largura de 7,7-22,8 μm , diâmetro do lume de 6,3-10,7 μm e espessura da parede de 3,6-7,6 μm . Rocha et al. (2004) verificaram comprimento de 888,2-981,1 μm , largura de 17,9-19,9 μm , diâmetro do lume de 10,6-12,0 μm e espessura da parede de 3,7 a 4,0 μm em amostras do lenho coletadas a 100% da altura do tronco de árvores de *E. grandis* aos 7 anos. Carvalho (2000) verificou valores médios de 1007 μm , 17,48 μm , 8,49 μm e 4,49 μm , respectivamente, para o comprimento, largura, diâmetro do lume e espessura da parede das fibras da madeira de *E. grandis* x *urophylla* com 7 anos. Na avaliação anatômica da madeira de *Eucalyptus grandis* com 10 anos de idade, Silva (2002) determinou largura média das fibras em 20,41 μm , diâmetro médio do lume em 12,85 μm e espessura média da parede em 3,37 μm .

A espessura média da parede das fibras (3,9 μm) no presente trabalho foi inferior a determinada por Alzate (2004) e similar a apresentada por Rocha et al. (2004), sendo que os demais parâmetros de medida das fibras foram similares aos da literatura.

4.1.6 Exame dos elementos anatômicos da madeira dissociados sob microscopia eletrônica de varredura (MEV)

A Figura 13 ilustra os componentes celulares dos cavacos da madeira de eucalipto macerados, possibilitando a sua comparação após a aplicação dos 3 tratamentos de desfibramento (item 4.2.5). Verifica-se nas imagens a presença de fibras íntegras e de elementos de vaso, sendo os últimos praticamente inexistentes na polpa desfibrada face a fragilidade de suas paredes delgadas, que se rompem pelo atrito mecânico quando da passagem dos cavacos de madeira entre os discos de desfibramento.

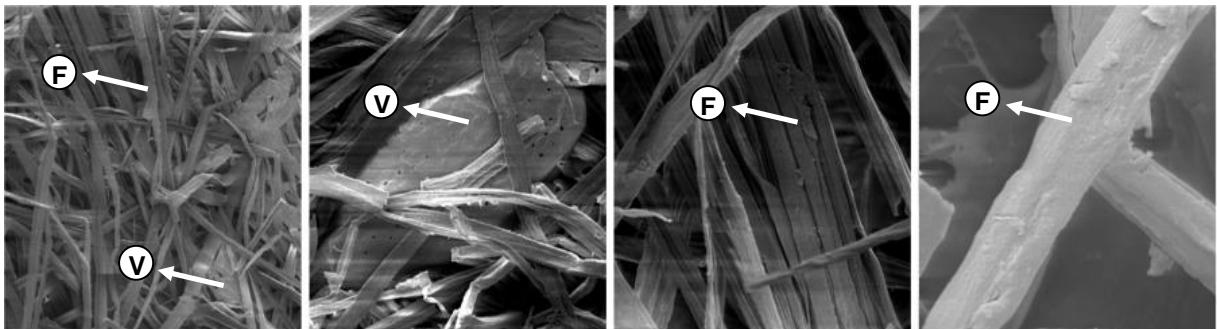


Figura 13 - Elementos anatômicos dissociados da madeira de eucalipto sob microscopia eletrônica de varredura. Fibras (F) e elemento de vaso (V) (Figuras com 200, 500, 2000x de ampliação, respectivamente)

4.2 Avaliação dos componentes celulares após o desfibramento dos cavacos de madeira

4.2.1 Classificação dos componentes celulares

Os resultados da classificação das fibras resultantes das três diferentes condições de desfibramento dos cavacos de madeira de eucalipto, através do equipamento Bauer McNett, expressos através da % de fibras retidas nas 4 peneiras de aberturas 20 a <150 mesh, são apresentados na Tabela 13, Figura 14 e no Anexo D.

Tabela 13 - Percentagem de retenção de fibras de cavacos de madeira de eucalipto, submetidos a três diferentes tratamentos de desfibramento, em 4 diferentes peneiras

Condição de desfibração	Abertura de peneira (mesh) / % retenção de fibras				
	20	35	65	150	< 150
A	24,9 a (25,8-23,9) (0,81) (3,3)	24,2 a (24,7-23,4) (0,47) (1,9)	27,6 a (28,5-26,9) (0,56) (2,0)	12,1 a (13,2-10,4) (0,95) (7,8)	11,3 ab (13,7-8,8) (1,72) (15,3)
B	46,6 b (48,1-45,7) (0,79) (1,7)	13,6 b (14,2-12,6) (0,54) (4,0)	18,3 b (19,9-17,1) (1,01) (5,5)	11,2 a (12,5-10,5) (0,77) (6,9)	10,3 b (11,6-8,5) (1,36) (13,2)
C	21,0 c (21,4-20,4) (0,36) (1,7)	21,0 c (21,7-20,3) (0,50) (2,4)	31,1 c (31,6-30,5) (0,42) (1,3)	14,7 b (15,0-14,4) (0,24) (1,7)	12,3 a (13,1-11,8) (0,52) (4,3)

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

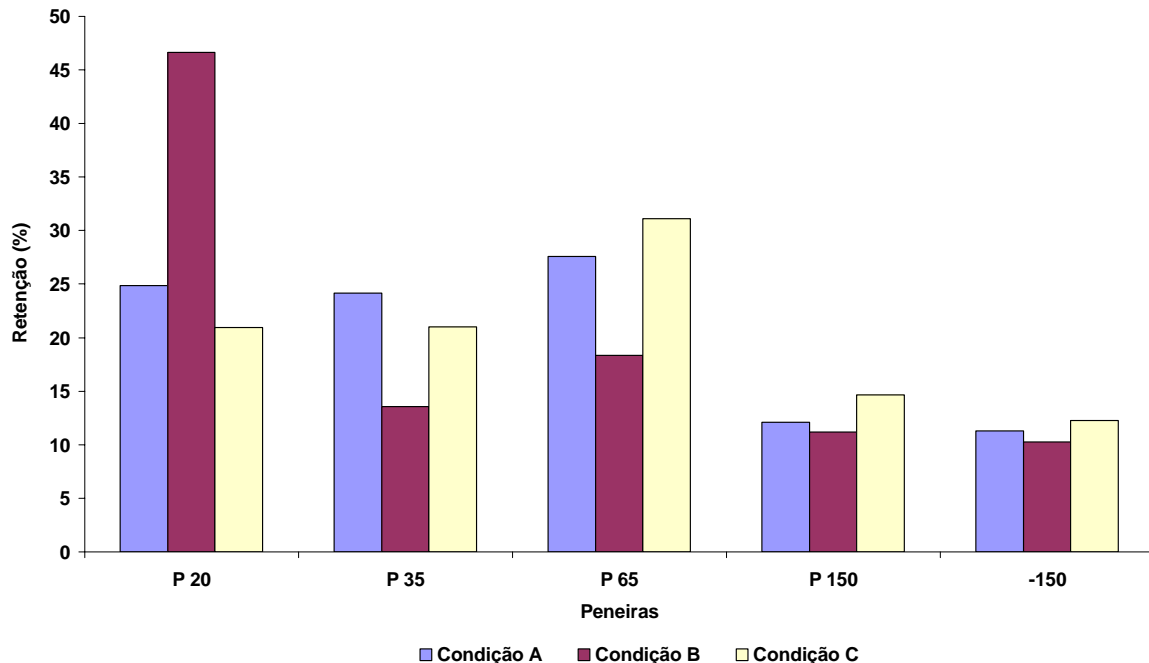


Figura 14 - Percentual de retenção de fibras de cavacos de madeira de eucalipto, submetidos a três diferentes tratamentos de desfibramento, em quatro diferentes peneiras

Através do exame da Tabela 13 é possível observar que houve diferenças significativas na % de fibras retidas nas peneiras em função dos tratamentos de desfibramento aplicados aos cavacos de madeira de eucalipto. Na condição B de desfibramento (menos agressiva aos componentes anatômicos da madeira) as porcentagens médias de retenção foram de 46,6-13,6-18,3-11,2-10,3% nas peneiras de 20-35-65-150-<150 mesh, respectivamente. Na condição C de desfibramento (mais agressiva aos componentes anatômicos da madeira) as % médias de retenção foram

de 21,0-21,0-31,1-14,7-12,3% nas mesmas peneiras. Na condição A de desfibramento (intermediária às condições B e C) as % médias de retenção foram de 24,9-24,2-27,6-12,1-11,3%, da mesma forma, nas mesmas peneiras. A condição C apresentou os valores de retenção mais próximos aos determinados por Benaduce (1998) para a polpa de *E. grandis* desfibrada, em condições de laboratório, com mesma pressão e tempo de aquecimento, sendo de 13,64-22,82-36,23-17,32-9,98% na seqüência de peneiras.

Esses resultados relacionam os 3 níveis de desfibramento dos cavacos de madeira de eucalipto com a % de retenção das fibras, indicando a indução de diferenças nos seus comprimentos médios. Desta forma, a condição de desfibramento B (menos agressiva a estrutura anatômica da madeira) mostrou maior percentual de retenção de fibras (46,6%) na peneira 20 (de maior abertura das malhas), diferenciando-se estatisticamente das demais e indicando menor % de ruptura da parede das fibras e formação de feixes de fibras (ou "shives"). Por outro lado, a condição de desfibramento C (mais agressiva a estrutura anatômica da madeira) mostrou, estatisticamente, maior retenção percentual das fibras (31,1%) na peneira 65 (de abertura média das malhas) e peneira 150 (14,7%), onde ocorre retenção de material fino. Estes percentuais de retenção apresentam diferenças estatísticas para as demais condições e indicam maior % de ruptura da parede das fibras sendo constituídas, comparativamente, por peneiras de menor abertura e indicando a presença de células curtas e maior desagregação ou ruptura em seu comprimento.

Portanto, a maior intensidade de refino caracterizada por (i) maiores pressões de aquecimento no desfibramento dos cavacos de madeira, (ii) maior período de permanência para o seu aquecimento e (iii) maior energia específica de desfibramento (menor abertura entre os discos de refinação para a passagem dos cavacos) promoveu material mais fracionado e com morfologia mais fina, condição inversa a das variáveis de desfibramento da condição B, resultado esperado para este trabalho.

4.2.2 Aspecto visual dos componentes celulares

O aspecto visual dos componentes celulares dos cavacos de madeira de eucalipto submetidos aos 3 diferentes tratamentos de desfibramento é apresentado na Figura 15.

As diferenças marcantes observadas referem-se a coloração dos componentes celulares da polpa, sendo mais clara na condição de desfibramento B e mais escura na condição C. Nesta, os elementos celulares apresentam-se com morfologia mais fina, ao contrário do observado nas condições A e B. Groom et al. (2004) verificaram que fibras refinadas entre 2-4 bar de pressão eram de coloração mais clara, com aumento no tamanho e número de fiapos de fibras (shives); e fibras refinadas a 12 bar de pressão eram mais escuras e com maior número de finos e, embora não foram as mesmas pressões do presente trabalho, corroboram com os seus resultados.

Esses efeitos sobre a estrutura anatômica da madeira dos cavacos de eucalipto são devidos às características dos tratamentos de desfibramento. Na condição C as condições aplicadas - maior tempo de aquecimento dos cavacos de madeira, maiores pressões de digestão e de energia de desfibramento - resultaram em material fibroso mais escuro e morfologia mais fina devido ao escurecimento da lignina pela alta intensidade de refino. Essa avaliação visual relacionadas com as dimensões dos elementos anatômicos de morfologia mais fina ou mais grosseira (condições de desfibramento C e B, respectivamente) é concordante com as determinações quantitativas realizadas com o equipamento Bauer McNett (item 6.2.1).

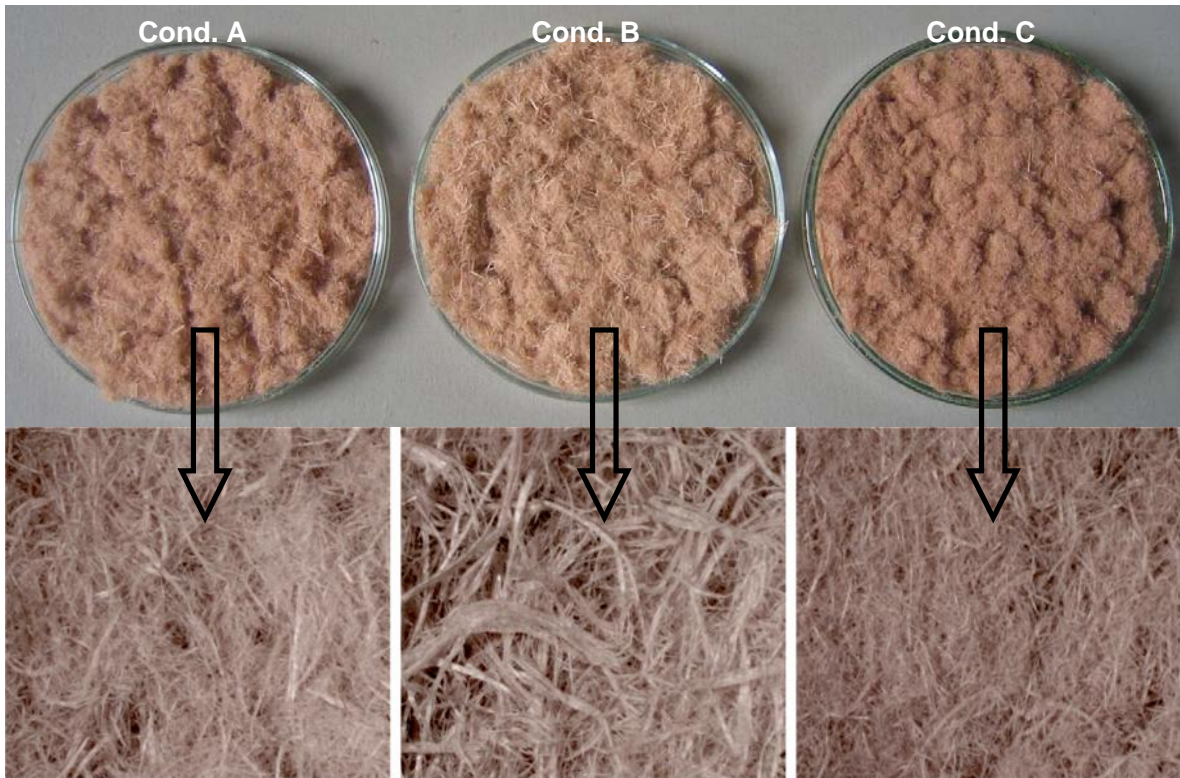


Figura 15 - Aspecto visual dos componentes celulares dos cavacos de madeira do eucalipto, submetidos a três diferentes tratamentos de desfibramento (A), (B) e (C) com ampliação de 35x

4.2.3 Caracterização dos componentes celulares

Os resultados da caracterização microscópica dos componentes celulares das frações fibrosas dos 3 tratamentos de desfibramento e retidas nas 5 peneiras de classificação do equipamento Bauer McNett são apresentados na Tabela 14 e Figura 16.

Houve similaridade estatística entre o número de fibras inteiras e de fibras quebradas para as 3 condições nas peneiras 20 e 35 mesh. Porém, analisando-se a distribuição percentual de fibras quebradas (relação entre fibras quebradas/fibras inteiras) nas diferentes peneiras verifica-se que para a condição de desfibramento C/peneira 20 o valor é de 57%, superior aos obtidos para as condições de desfibramento A e B/peneira 20, com valores de 40 e 38%, respectivamente. Na peneira 150, observa-se para as condições de desfibramento A e C valores de 41 e 42%, em relação a B, com valor de 33%.

Quanto à presença de elementos de vaso e parênquima, a condição de desfibramento B/peneiras 35 e 150 apresenta diferença estatística para com C indicando aumento da presença destes elementos com intensidade de refino mais amena. A peneira 65, mesmo sem diferença estatística entre as condições, indicou maior presença destes elementos para a condição B.

Nas três condições de desfibramento verifica-se um número de feixes de fibras com similaridade estatística nas peneiras 20 e 35, sendo um indicador numérico não representando as dimensões das fibras e/ou de feixes de fibras. Isto deve-se ao campo de observação da imagem (X 25) não possibilitar a visualização do comprimento total dos feixes de fibras. Já para as peneiras 65 e 150 é possível verificar diferença significativa com menor número de fibras quebradas e maior número de feixes para a condição B. No entanto, o comprimento médio das fibras (ou dos elementos celulares) pode ser verificado no item 5.2.4, confirmando o maior valor na condição B, com a presença de feixes de fibra de maior comprimento nesta condição; outras observações corroboram a maior retenção de fibras na 1ª peneira do classificador Bauer McNett (ver item 4.2.1), bem como os aspectos visuais dos componentes (ver item 4.2.2).

Tabela 14 - Percentual de fibras quebradas e número de feixes de fibras, vasos e parênquima dos componentes celulares dos cavacos de madeira do eucalipto, submetidos a três diferentes tratamentos de desfibramento

Componente	Condição	Peneira			
		20	35	65	150
Fibras inteiras	A	3,54 a	4,95 a	9,00 a	9,90 a
	B	3,81 a	5,53 a	7,62 a	7,62 a
	C	3,30 a	4,71 a	8,25 a	8,25 a
Fibras quebradas	A	1,43 a	1,85 a	3,64 a	4,10 a
	B	1,46 a	2,06 a	2,46 b	2,54 b
	C	1,87 a	1,86 a	3,67 a	3,50 ab
Nº feixes	A	7,14 a	8,25 a	3,36 ab	0,10 a
	B	7,04 a	7,88 a	4,31 a	1,23 b
	C	6,00 a	7,29 a	1,58 b	0,00 a
Nº vasos	A	0,14 a	0,15 ab	2,45 a	9,00 ab
	B	0,12 a	0,88 a	2,69 a	11,00 a
	C	0,17 a	0,10 b	1,17 a	5,17 b
Nº parênquima	A	0,00 a	0,00 a	0,18 a	0,00 a
	B	0,04 a	0,47 b	0,23 a	0,31 b
	C	0,00 a	0,00 a	0,00 a	0,00 a

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

A Figura 16 ilustra os componentes celulares da madeira dos cavacos de eucalipto - após a aplicação das 3 condições de desfibramento – e retidos nas peneiras 20-35-65-150 mesh.

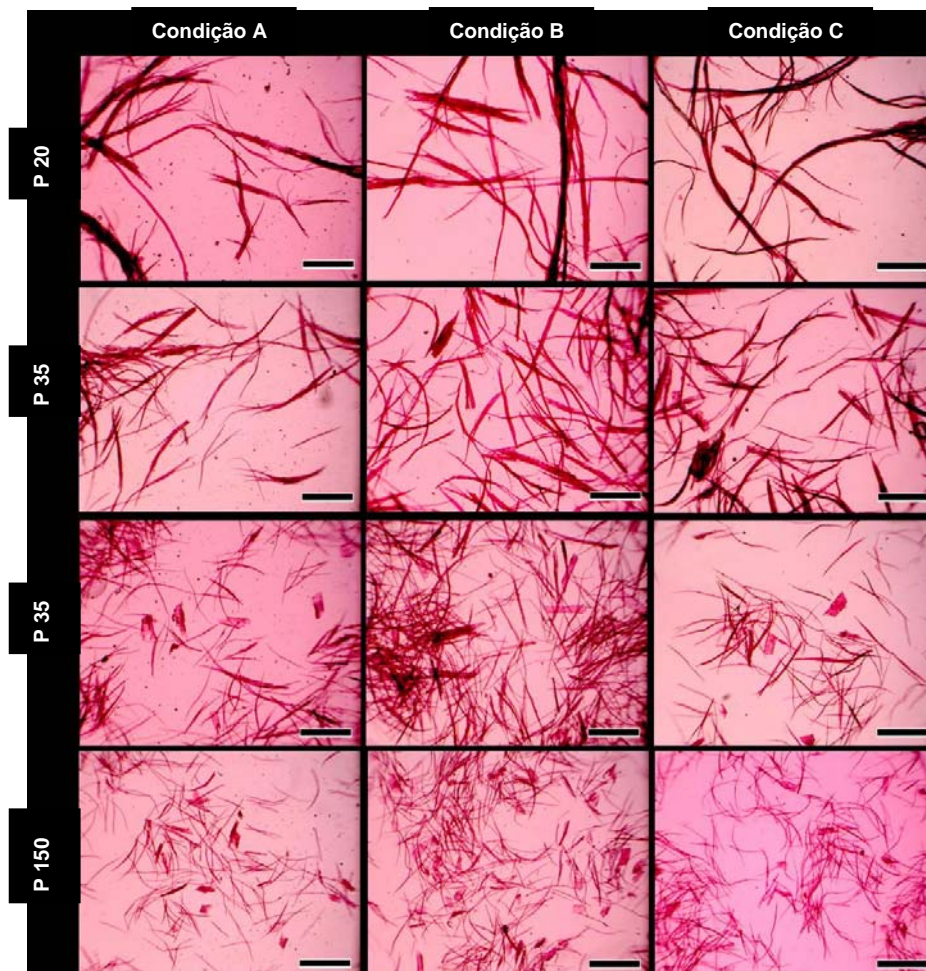


Figura 16 - Componentes celulares da madeira dos cavacos de eucalipto submetidos a 3 condições de desfibramento e classificados em peneiras de 20-35-65-150 mesh. Barra: 500 μ m

Os valores das dimensões das fibras (comprimento, largura, diâmetro do lume e espessura da parede das fibras), após a aplicação dos 3 tratamentos de desfibramento da madeira, retidas nas 4 diferentes peneiras (classificação via úmido Bauer McNett) são apresentados na Tabela 15.

É possível notar, de modo geral, valores similares e não significativos para as dimensões das fibras entre as aberturas de peneiras para todas as condições, exceto para comprimento e espessura da parede (peneiras 20 e 35) e diâmetro do lume das fibras (peneira 65). Esses valores indicam que a alta intensidade de refino praticada na condição C não promoveu colapso da parede das fibras, corroborado através dos resultados de espessura da parede ligeiramente superiores para as fibras desta condição. O material desfibrado apresentou largura das fibras e espessura da parede ligeiramente superior ao material macerado (item 4.1.5). Possivelmente, esse valor deve-se as alterações provocadas na parede celular das fibras no processo de desfibramento e pela deposição de aditivo (resina amínica) sobre a superfície externa das fibras, permanecendo aderido até sua ativação na fase de prensagem dos painéis MDF.

A avaliação do comprimento das fibras retidas nas peneiras de classificação indicou valores médios de 940, 1000 e 920 μm para as condições de desfibramento A, B e C, respectivamente, indicando a maior ruptura axial das fibras com o acréscimo da intensidade de refinação da condição C. O comprimento médio verificado para a condição C (920 μm) foi inferior aos valores médios determinados por Alzate (2004) em 1003 μm e Rocha et al. (2004) em 1007 μm para fibras do lenho de *E. grandis* aos 7 anos de idade. Analisando os comprimentos das fibras retidas nas diferentes peneiras e entre as condições, é possível verificar diferença estatística no comprimento das fibras da condição B retidas nas peneiras 20 e 35 (peneiras de maior abertura), ratificando maior comprimento de fibras para esta condição e indicativo da presença de feixes, face também à similaridade estatística entre as condições para as peneiras de menores aberturas (65 e 150).

Tabela 15 – Comprimento, largura, diâmetro do lume e espessura da parede das fibras dos cavacos de madeira do eucalipto após desfibramento em três condições diferentes

Dimensões da fibra (µm)	Condição de desfibrção	Peneira (mesh)			
		20	35	65	150
Comprimento	A	920,01 a (1224,36-624,24) (1,46) (0,16)	956,38 a (1350,83-697,54) (16,14) (1,69)	996,49 a (1270,52-749,87) (6,32) (0,63)	868,24 a (1118,85-644,56) (9,69) (1,12)
	B	1064,94 b (1648,91-737,03) (30,27) (2,84)	1037,43 b (1582,30-677,18) (47,03) (4,53)	1006,65 a (1554,42-688,12) (9,26) (0,92)	893,03 a (1229,86-658,46) (8,21) (0,92)
	C	915,50 a (1314,30-628,82) (15,12) (1,65)	944,47 a (1328,62-591,45) (27,58) (2,92)	961,75 a (1335,30-686,79) (30,35) (3,16)	852,07 a (1070,39-620,89) (24,68) (2,90)
Largura da Fibra	A	20,54 a (25,88-16,53) (0,92) (4,48)	20,59 a (27,40-14,72) (0,74) (3,61)	21,62 a (26,92-15,31) (0,63) (2,90)	21,04 a (25,07-15,10) (0,34) (1,60)
	B	20,96 a (28,42-14,58) (0,38) (1,81)	21,10 a (27,87-15,93) (0,36) (1,70)	21,66 a (28,07-16,27) (0,34) (1,55)	20,63 a (24,70-14,23) (0,19) (0,91)
	C	21,20 a (28,34-16,19) (0,11) (0,50)	21,03 a (27,82-16,05) (0,18) (0,86)	21,29 a (27,22-16,50) (0,78) (3,66)	21,15 a (28,60-15,32) (0,41) (1,93)
Diâmetro do lume	A	11,59 a (18,71-6,83) (1,04) (8,99)	11,55 a (17,00-7,34) (1,05) (9,12)	12,55 a (20,08-8,41) (0,56) (4,46)	12,35 a (18,78-7,49) (0,26) (2,12)
	B	11,20 a (18,68-6,24) (0,65) (5,79)	11,53 a (21,25-7,18) (0,68) (5,90)	12,15 ab (18,72-7,57) (0,14) (1,17)	11,68 a (17,65-7,47) (0,27) (2,27)
	C	11,04 a (17,67-5,84) (0,65) (5,84)	11,18 a (16,80-6,00) (0,57) (5,13)	11,62 b (19,05-5,78) (0,61) (5,28)	11,81 a (19,10-6,77) (0,48) (4,06)
Espessura da parede	A	4,48 a (7,31-2,27) (0,09) (2,00)	4,52 a (6,81-1,67) (0,35) (7,68)	4,53 a (7,30-1,20) (0,06) (1,31)	4,35 a (7,66-0,60) (0,04) (0,96)
	B	4,88 ab (7,20-3,03) (0,23) (4,71)	4,79 ab (7,14-1,97) (0,27) (5,66)	4,76 a (7,27-2,78) (0,21) (4,51)	4,48 a (6,58-2,00) (0,14) (3,14)
	C	5,08 b (9,01-2,58) (0,29) (5,68)	4,93 b (7,63-2,88) (0,37) (7,41)	4,84 a (7,20-2,91) (0,14) (2,91)	4,67 a (7,97-2,65) (0,04) (0,77)

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

4.2.4 Comprimento médio dos componentes celulares

O comprimento médio dos componentes celulares (retidos nas peneiras de classificação) foi de 1,28, 1,67 e 1,19 mm, nas diferentes condições de desfibramento A, B e C, respectivamente, conforme equação descrita no item 3.5.4.4.

A literatura cita comprimentos médios para as fibras de eucalipto na faixa de 1,0 mm (conforme item 4.1.5) e variações de comprimento entre 0,68 e 1,32 mm para *Eucalyptus grandis* (Tomazello Filho, 1985a). Assim, o comprimento médio das fibras verificado para a condição B (1,67 mm) excede limites máximos já determinados e corrobora com a grande presença de feixes de fibras nesta condição.

O maior comprimento dos componentes celulares observado na condição de desfibramento B reflete a alta percentagem de material retido na 1ª peneira de classificação (item 4.2.1). Indica, também, a existência de material fibroso composto de alto teor de feixes de fibras, podendo resultar na perda da qualidade superficial aparente e no desempenho em acabamento pós usinagem dos painéis MDF. A perda da qualidade superficial foi indicada anteriormente (item 4.2.2, Figura 17).

O comprimento médio dos componentes celulares (principalmente das fibras) constitui-se em importante parâmetro anatômico da madeira no processo de confecção de painéis MDF de média e alta densidade. O comprimento das fibras influencia diretamente na facilidade ou não de retirada de vapor de água do interior das chapas durante a sua prensagem e também na qualidade tecnológica final dos painéis MDF. O maior comprimento médio das fibras resulta em menor área aparente de fibras/feixes e, em consequência, maior presença de micro espaços internos durante a confecção do painel MDF, facilitando a retirada da pressão de vapor presente no centro do painel e a consequente cura da resina. Deve-se, porém, considerar que a feixes de fibras na superfície dos painéis MDF prejudica a sua qualidade aparente, resultando na exigência de re-trabalho de lixamento para obter a mesma qualidade final de um painel confeccionado com material desfibrado de menor comprimento médio.

4.2.5 Exame dos componentes após desfibramento sob microscopia eletrônica de varredura (MEV)

As imagens dos componentes celulares dos cavacos de madeira após a aplicação das três condições de desfibramento (A, B, C) são apresentadas na Figura 17. Enquanto que na condição de desfibramento B é característica a presença de feixes de fibras, na A verificam-se fibras íntegras e dissociadas na lamela média, podendo ser consideradas como a morfologia de fibras mais adequada para a confecção de painéis MDF. Por outro lado, na condição C detecta-se a maior frequência de fibras fraturadas, corroborando o resultado das análises anteriores (itens 4.2.2 e 4.2.4). Nessa condição mais extrema de desfibramento (condição C) mesmo a eventual presença de feixes de fibras, indicada pela retenção de 21% na peneira 20

(item 4.2.1) a ocorrência da fratura transversal da parede das fibras pode ser comprovada pelas imagens do MEV (ampliação 500X; condição C).

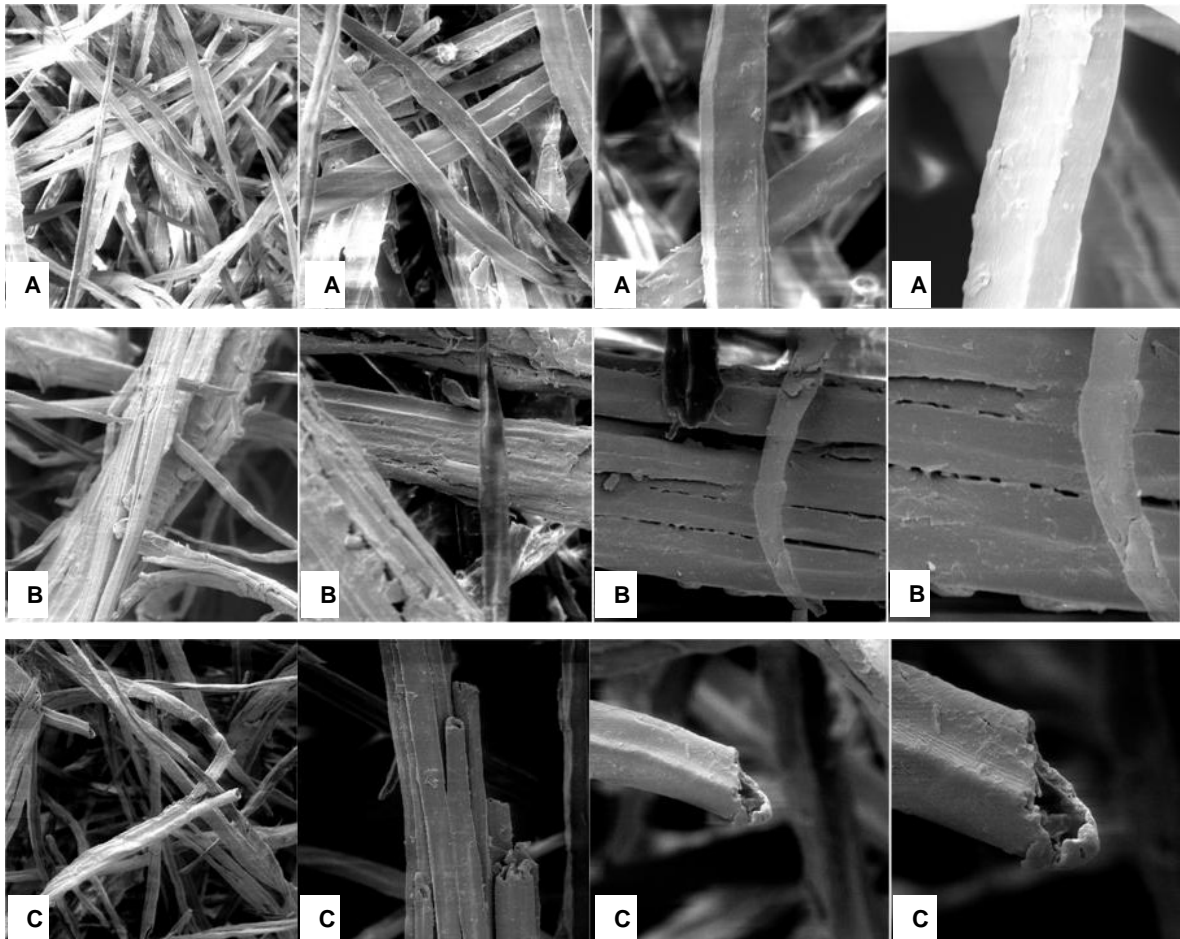


Figura 17 - Componentes celulares da madeira de eucalipto após as 3 condições de desfibramento (A, B, C) sob MEV (200, 500, 1000 e 2000X, respectivamente)

4.3 Determinação das propriedades tecnológicas dos painéis MDF

Os resultados da avaliação das propriedades tecnológicas dos painéis MDF confeccionados com a madeira de eucalipto e submetida a 3 diferentes condições de desfibramento na linha de produção e em condições de laboratório são apresentados nas Tabelas 16 e 17, respectivamente, e Anexos E e F.

Analisando comparativamente as propriedades tecnológicas dos painéis MDF confeccionados nas condições de desfibramento A (intermediária), B (mais branda) e C

(mais drástica), em linha de produção (Tabela 16), pode-se discutir os seguintes aspectos:

- os menores valores nos ensaios de inchamento e absorção e os maiores para a resistência ao arranque de parafuso no topo foram obtidos nos corpos de prova das chapas confeccionadas com fibras da condição de desfibramento B, com significância estatística em relação à condição de desfibramento A e C. Isto deve-se possivelmente às alterações da morfologia dos componentes celulares dos cavacos de madeira de eucalipto após o tratamento de desfibramento mais brando, que foram descritas em itens anteriores (4.2.1 e 4.2.2). A presença de feixes de fibras e de frações mais grosseiras do lenho conferiu maior resistência ao arranque de parafuso no topo e na face dos corpos de prova de painéis MDF da condição B, sendo uma característica interessante no que concerne a sua aplicabilidade final. Por outro lado, a menor área aparente de componentes, comparativamente à alta fração de finos e conseqüente maior área aparente da condição C, resultou em menor área de parede celular das fibras exposta à absorção de umidade e, conseqüentemente, os menores valores de inchamento e absorção.

- a densidade dos painéis da condição B foi significativamente menor em relação às condições A e C, as quais equivaleram-se estatisticamente, apesar dos seus valores médios entre condições apresentaram-se próximos: 692, 704 e 702 kg/m³ - respectivamente.

- a morfologia dos componentes celulares da condição de desfibramento B não conferiu acréscimo de resistência mecânica aos painéis MDF, verificados estatisticamente através de menores resistências nos ensaios de MOR, MOE e resistência superficial e similar resistência à tração perpendicular, comparativamente à condição A. Portanto, a manutenção de feixes de fibras não induz acréscimo de propriedades mecânicas aos painéis.

- os painéis MDF da condição de desfibramento C apresentaram pior desempenho para os ensaios de resistência à tração perpendicular, superficial e arranque de parafuso topo, bem como para os parâmetros de inchamento e absorção dos corpos de prova. A morfologia dos componentes celulares caracterizada, notadamente, por frações finas e pelo alto percentual de fibras fracionadas (conforme

já discutido) indica que condições de maior intensidade de refino resultam em maior colapso dos componentes celulares e perda de resistência dos painéis MDF, mesmo com os resultados tecnológicos atendendo a norma NBR 15316-2 (2006). A morfologia mais fina dos elementos celulares promove, por sua vez, um acréscimo da área específica aparente, indicando a formação de maior área de superfície de parede das fibras a ser recoberta com a mesma quantidade de resina utilizada nas demais condições de desfibramento. Deve-se considerar, também, o aumento das fibras com secções, devendo ser estas a principal causa de redução de algumas propriedades tecnológicas verificadas para os painéis MDF. Ainda, a maior área aparente de fibras nos painéis MDF pode promover maior absorção de água durante os ensaios de inchamento e absorção. As maiores energias específicas envolvidas no processo de desfibramento C refletem em acréscimo nos custos finais de produção dos painéis MDF. De outro lado, a qualidade superficial aparente superior dos painéis MDF, com textura fina e ausência de feixes de fibras, constitui-se em indicativo de melhor desempenho em acabamentos pós usinagem dos painéis sendo um aspecto positivo desta condição de desfibramento.

- Chapas MDF obtidas na condição de desfibramento A apresentaram os maiores e significativos valores nos ensaios de MOR e MOE, bastante influenciados devido à alta resistência superficial dos painéis obtidos nesta condição.

Tabela 16 - Propriedades tecnológicas dos painéis MDF de fibras de cavacos de madeira de eucalipto, submetida a três diferentes tratamentos de desfibramento (A, B, C), confeccionados em linha de produção

Variáveis tecnológicas	Condições de desfibrção		
	A	B	C
Densidade básica (kg/m³)	704 a (710-692) (4,6) (0,7)	692 b (715-674) (8,6) (1,2)	702 a (715-674) (4,8) (0,7)
Módulo de ruptura (N/mm²)	44,7 a (48,3-42,1) (1,6) (3,5)	40,7 b (44,7-38,6) (1,6) (3,8)	40,0 b (42,7-36,9) (1,6) (4,1)
Módulo de elasticidade (N/mm²)	4283 a (4378-4051) (77) (1,8)	3910 b (4080-3724) (103) (2,6)	3891 b (4069-3694) (109) (2,8)
Resistência à tração perpendicular (N/mm²)	1,00 a (1,14-0,83) (0,09) (9,1)	0,96 a (1,06-0,84) (0,05) (5,4)	0,77 b (1,0-0,61) (0,1) (13,6)
Resistência à tração superficial (N/mm²)	2,40 a (2,75-2,0) (0,21) (8,7)	2,24 b (2,58-1,77) (0,23) (10,4)	1,68 c (2,04-1,39) (0,16) (9,7)
Resistência ao arranque parafuso topo (kgf)	135 a (140-129) (2,9) (2,2)	146 b (173-124) (13,8) (9,4)	108 c (115-101) (3,3) (3,0)
Resistência ao arranque parafuso face (kgf)	126 ab (130-122) (2,3) (1,8)	129 b (154-112) (10,7) (8,3)	121 a (130-111) (5,0) (4,1)
Inchamento em espessura (%)	5,8 a (6,7-5,1) (0,4) (7,0)	5,1 b (5,6-4,6) (0,2) (4,3)	8,6 c (10,6-7,6) (0,8) (9,0)
Absorção de água (%)	33,7 a (35,5-31,8) (1,0) (2,8)	26,0 b (28,8-24,1) (1,1) (4,3)	41,8 c (50,1-33,3) (5,0) (11,9)

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).

Analisando as propriedades tecnológicas dos painéis confeccionados nas condições A, B e C, em laboratório (Tabela 17, Anexo F), podem-se discutir os seguintes aspectos:

- a densidade dos painéis MDF não foi significativa para as três condições de desfibramento A, B e C, com valores médios de 695, 701 e 690 kg/m³, respectivamente.

- painéis MDF laboratoriais da condição de desfibramento C apresentaram o desempenho menos satisfatório para as propriedades de resistência à tração perpendicular, superficial e arranque de parafuso na face e topo, bem como para parâmetros físicos de inchamento e absorção. Os valores de inchamento apresentaram a mesma tendência dos painéis de linha de produção, porém com valores mais elevados, com valor médio final acima do máximo especificado pela NBR 15316 (2006) em máximo 12%.

Tabela 17 - Propriedades tecnológicas dos painéis MDF de fibras de cavacos de madeira de eucalipto, submetida a três diferentes tratamentos de desfibramento (A, B, C), confeccionados em condições de laboratório

Variáveis tecnológicas	Condições de desfibrção		
	A	B	C
Densidade básica (kg/m³)	695 a (751-672) (21) (3,0)	701 a (752-654) (22) (3,2)	690 a (724-640) (21) (3,1)
Módulo de ruptura (N/mm²)	36,1 a (43,5-27,6) (3,7) (10,2)	31,8 b (39,9-25,2) (3,9) (12,2)	31,4 b (42,5-25,5) (4,0) (12,7)
Módulo de elasticidade (N/mm²)	3776 a (4330-3384) (240) (6,4)	3662 a (4325-3306) (252) (6,9)	3704 a (4087-3210) (243) (6,6)
Resistência à tração perpendicular (N/mm²)	1,01 a (1,13-0,75) (0,15) (14,7)	0,99 a (1,32-0,66) (0,16) (16,5)	0,78 b (1,06-0,55) (0,15) (19,1)
Resistência à tração superficial (N/mm²)	2,11 a (2,62-1,11) (0,37) (18,1)	2,12 a (2,81-1,60) (0,28) (13,2)	1,36 b (1,70-1,04) (0,17) (12,2)
Resistência ao arranque parafuso topo (kgf)	136 a (165-110) (19,6) (14,4)	149 a (181-129) (16,1) (10,8)	107 b (141-87) (14,9) (13,9)
Resistência ao arranque parafuso face (kgf)	123 a (176-107) (18,2) (14,4)	141 b (160-110) (14,6) (10,4)	96 c (136-74) (16,8) (17,6)
Inchamento em espessura (%)	9,5 a (11,8-6,9) (1,2) (12,5)	6,9 b (7,6-5,6) (0,5) (7,7)	14,5 c (16,2-10,9) (1,3) (9,3)
Absorção de água (%)	56,1 a (68,6-39,9) (7,0) (12,6)	36,3 b (41,4-28,4) (3,2) (8,9)	68,8 c (82,2-50,2) (8,8) (13,1)

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) .

4.4 Painéis MDF de linha de produção x Painéis MDF de escala laboratorial

Os painéis MDF obtidos em laboratório e em linha de produção, nas três condições de desfibramento, apresentaram valores de resistência à tração perpendicular similares. Este ensaio, associado com o perfil de densidade das chapas, podem ser considerados como os mais importantes controles, direcionando as ações e ajustes necessários na unidade fabril, pois são condicionantes do processo nas propriedades tecnológicas dos painéis MDF. Mesmo com os valores diferenciados para todos os ensaios, os painéis MDF obtidos em linha de produção e no laboratório mantiveram a classificação tecnológica sendo, porém, observada redução de valores para os painéis laboratoriais nos ensaios de (i) módulo de ruptura, (ii) módulo de elasticidade e (iii) resistência à tração superficial.

Face a limitação de largura e espessura na confecção de chapas laboratoriais para um máximo de 380 mm quando o valor requerido para o comprimento dos corpos de prova para os ensaios de módulo de ruptura e elasticidade, no caso de uma espessura final de 18 mm, é de 410 mm, o apoio lateral dos CPs laboratoriais foi reduzido de 50 mm para 30 mm. Deve-se, no entanto, destacar que estas variáveis são altamente dependentes da densidade das faces do painel MDF: os painéis MDF da condição A obtidos em linha de produção e em planta laboratorial apresentaram faces com densidades médias de 1021 e 1007 kg/m³ e resistência superficial de 2,4 e 1,97 N/mm², além de desvios padrão de 13 e 24%, respectivamente, com maior heterogeneidade para os painéis laboratoriais. A formação do colchão de fibras anteriormente à prensagem, feita de modo manual, pode apresentar influência sobre estes resultados. Ainda, as plantas laboratoriais não apresentam gradiente de temperatura durante o ciclo de prensagem – as temperaturas são normalmente maiores no início da prensagem, decrescendo no seu estágio final. O ciclo de prensagem pode ser controlado na linha de produção auxiliando na cura das faces superior e inferior dos painéis MDF, induzindo normalmente maior densificação destas duas faces e, conseqüente, aumento das resistências superficiais.

Mesmos com os valores diferenciados de densidade máxima, os perfis de densidade das chapas MDF confeccionados em linha de produção e em laboratório

são semelhantes (vide Figura 18), ratificando a similaridade entre os ciclos de prensagem da linha de produção e do laboratório.

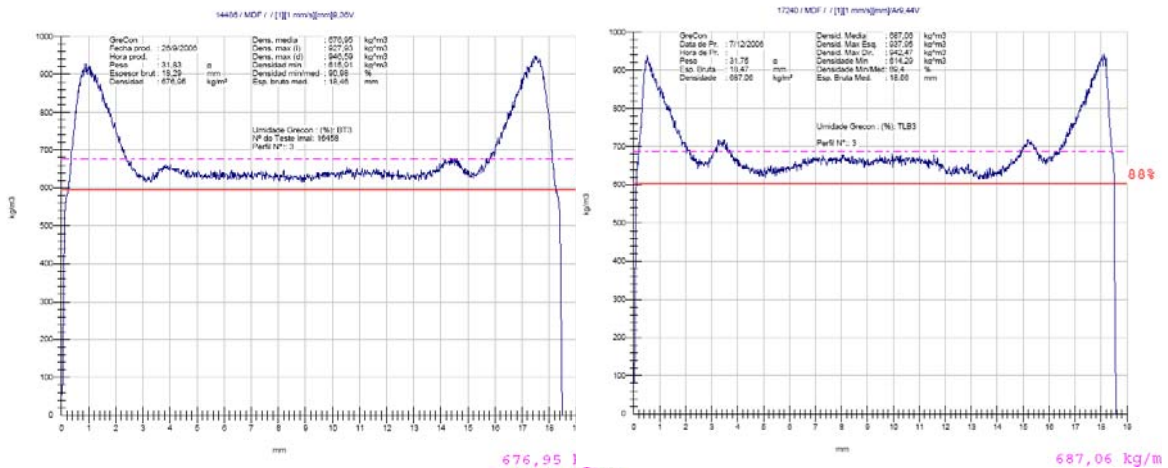


Figura 18 - Perfis de densidade dos painéis MDF de madeira de eucalipto confeccionados em laboratório e em linha de produção

Os valores médios de inchamento dos painéis MDF produzidos em laboratório apresentaram pior desempenho do que os da linha produtiva, inclusive com os painéis MDF da condição de desfibramento C apresentando valor médio acima do limite máximo estabelecido. Esse parâmetro tecnológico induz a necessidade de ajustes de processo para adequação à especificação estabelecida, como exemplo, o aumento da dosagem da emulsão de parafina, observando-se apenas os resultados laboratoriais. Assim, para a ratificação dos resultados obtidos em escala laboratorial, torna-se interessante a reprodução das variáveis envolvidas em real situação de confecção dos painéis para maior segurança na tomada de decisões.

4.5 Aspectos visuais dos componentes celulares dos painéis MDF

A superfície dos painéis MDF confeccionados com componentes celulares das três condições de desfibramento da madeira de eucalipto é ilustrada na Figura 19. As diferenças entre os tratamentos são perceptíveis quanto ao aspecto visual – coloração e textura - dos componentes celulares da madeira na superfície das chapas MDF (ver

Figura 19). As chapas MDF produzidas na condição de desfibramento B (mais branda) evidenciam uma textura grosseira, caracterizada pela aglutinação de elementos fibrosos dispostos em feixes (destacando-se em parte da superfície do painel MDF) e de coloração mais clara. Por outro lado, as chapas MDF produzidas na condição C (mais agressiva) evidenciam textura mais fina, com elementos celulares menores e mais aglutinados e de coloração mais escura. Portanto, mantidas constantes as condições de produção relacionadas com qualidade tecnológica do painel MDF, as diferentes morfologias das “fibras” oriundas do processo de desfibramento dos cavacos de madeira de *Eucalyptus grandis* podem resultar em material “fibra” classificado como (i) *mais grosseiro* com melhor desempenho operacional nas etapas de degasagem (retirada do vapor no centro da chapa MDF durante sua produção na prensa contínua) e de refinação (menor consumo energético) podendo, no entanto, comprometer a sua qualidade visual e até inviabilizá-lo para aplicações que requerem excelente qualidade de usinabilidade ou (ii) *mais refinado* ou de morfologia mais fina, que resulta em maior dificuldade da retirada de vapor do centro da chapa MDF na sua prensagem (chapa MDF de maior densidade aparente - kg “fibra”/m³ - indicando maior concentração de “fibras” em um mesmo volume) e maior consumo de energia refinação (necessidade da maior proximidade entre os discos refinadores para induzir maior atrito entre os cavacos de madeira e, conseqüente, formação de “fibra” mais fina), possivelmente resultando em um painel excelente qualidade pós-usinagem.

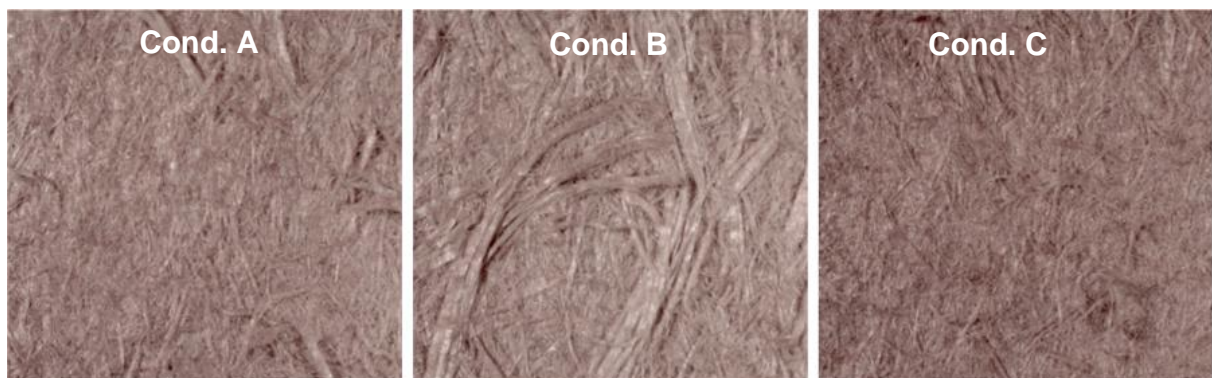


Figura 19 – Características da superfície dos painéis MDF de componentes celulares da madeira do eucalipto, em três diferentes tratamentos de desfibramento. (A, B, C) (50 X, ampliação)

4.6 Exame da região central dos painéis MDF sob microscopia eletrônica de varredura (MEV)

A estrutura interna dos painéis MDF confeccionados com cavacos de madeira de eucalipto submetidos a três diferentes tratamentos de desfibramento, analisada sob microscopia eletrônica de varredura, é apresentada na Figura 20. Através da imagem da estrutura interna pode-se analisar o efeito dos tratamentos de desfibramento, bem como corroborar as diferentes análises, determinações e observações sob microscopia de luz dos elementos celulares.

Verifica-se que as amostras dos painéis MDF da condição de desfibramento A são constituídas principalmente por fibras inteiras, individualizadas e entrelaçadas. Estas são indicativas da separação das fibras na região da lamela média, uma vez que não foi detectado rompimento nas suas paredes.

Por outro lado, na condição de desfibramento B verifica-se a presença de fibras em feixes, entrelaçadas e mantendo-se unidas através da lamela média. Os aspectos morfológicos das fibras relacionam-se com intensidade de refino aplicada nos cavacos de madeira de eucalipto, mantendo parcialmente as ligações fibra-fibra pela lamela média.

As amostras dos painéis MDF da condição de desfibramento C são constituídas principalmente por fibras individualizadas, entrelaçadas e, em alta porcentagem com as suas paredes fraturadas pelo tratamento aplicado: ocorreu a separação da lamela média, mas as condições mais drásticas de desfibramento induziram a ruptura axial da parede das fibras.

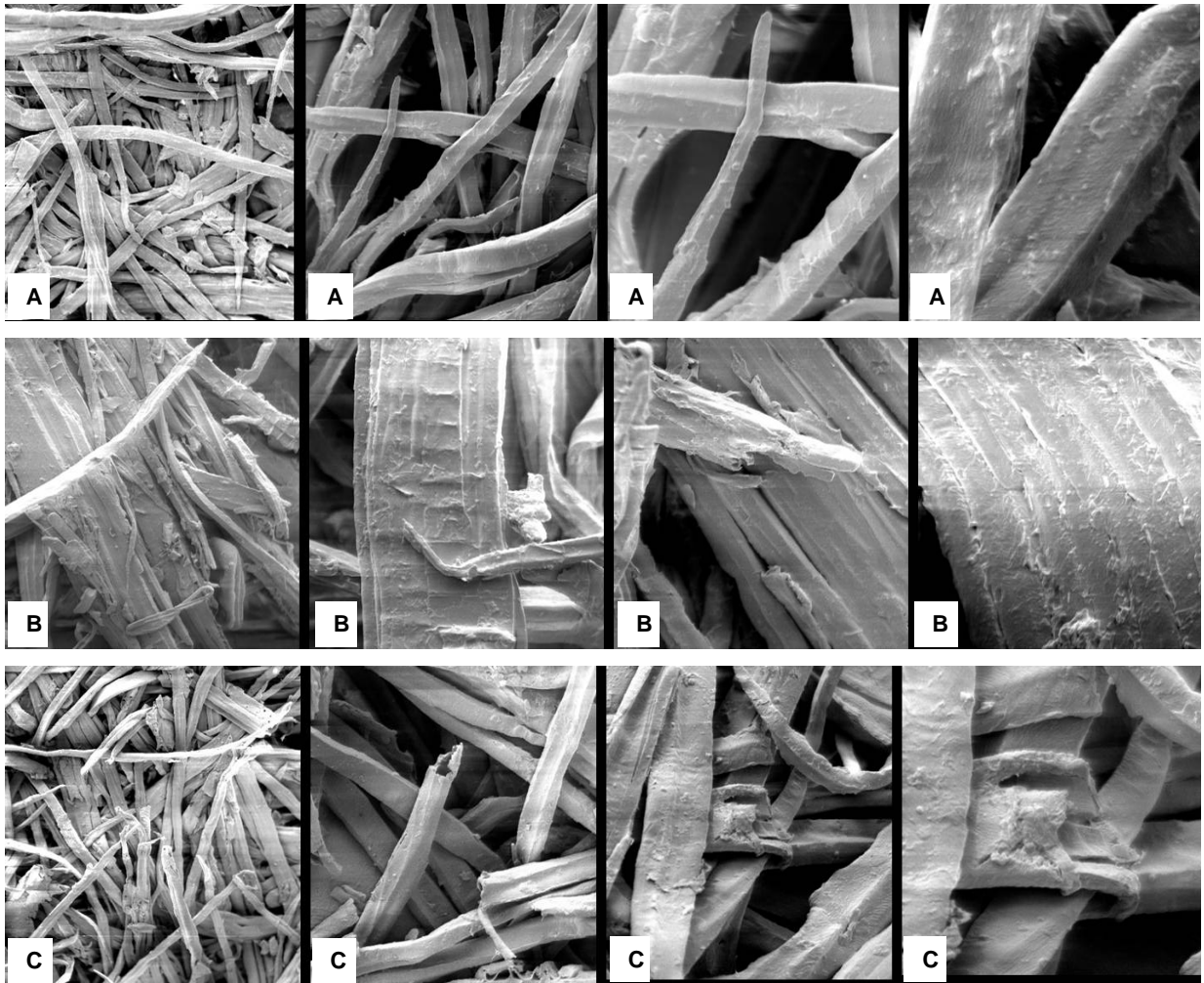


Figura 20 - Estrutura dos painéis MDF confeccionados com fibras de cavacos de madeira de eucalipto, submetida a três diferentes tratamentos de desfibramento (A, B, C), sob microscopia eletrônica de varredura. (200, 500, 1000 e 2000x)

5 CONCLUSÕES

Os resultados do presente trabalho permitem concluir que:

- os cavacos de madeira de eucalipto utilizados nas 3 pré-condições de desfibramento foram homogêneos em relação a sua morfologia e estrutura anatômica microscópica.

- a classificação via úmido das fibras e demais componentes celulares da madeira indicou, na condição de desfibramento mais branda (B), a presença de maior percentagem de feixes de fibras na peneira 20 mesh.

- o comprimento médio dos componentes celulares resultantes da condição de desfibramento B, retidos em todas as peneiras, foi 30 a 40% superior ao verificado na intermediária (A) e mais drástica (C), respectivamente.

- o aumento da intensidade de refino dos cavacos reduziu o comprimento médio das fibras, aumentou o percentual de fibras quebradas, diminuiu a freqüência de vasos e parênquima e promoveu o escurecimento desses elementos celulares.

- as fibras da madeira, no processo de desfibramento, separaram-se normalmente na região da lamela média, conforme exame de microscopia eletrônica de varredura.

- os painéis MDF com as diferentes morfologias de fibras atenderam a norma NBR 15316-2 (2006), a exceção do inchamento dos painéis laboratoriais na condição C.

- os painéis MDF de elementos celulares de morfologia mais fina (condição C) obtidos em linha de produção e em laboratório apresentaram redução nas propriedades de resistência à tração perpendicular, superficial e arranque de parafuso topo, em relação aos painéis das condições A e B.

- na condição C, o aumento da área específica das fibras afetou o recobrimento de suas paredes pela resina, induzindo uma maior área de fibras exposta à adsorção de umidade, indicada pelos valores de inchamento dos painéis.

REFERÊNCIAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DE PAINÉIS DE MADEIRA. Desenvolvimento de Mercados para Produtos de Madeira de Florestas Plantadas. In: CONGRESSO INTERNACIONAL DE PRODUTOS DE MADEIRA SÓLIDA DE FLORESTAS PLANTADAS, 3., 2006. Curitiba. **Anais...** Curitiba: ABIPA, 2006. CD-Room.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Chapas de fibra de média densidade**. Rio de Janeiro: ABNT, 2006. 4 p. pt. 1: Terminologia (NBR 15316).
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Chapas de fibra de média densidade**. Rio de Janeiro: ABNT, 2006. 4 p. pt. 2: Requisitos (NBR 15316).
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Chapas de fibra de média densidade**. Rio de Janeiro: ABNT, 2006. 48 p. pt. 3: Métodos de ensaio (NBR 15316).
- ALBUQUERQUE, C.E.C.; IWAKIRI, S.; JÚNIOR, S.K. Adesão e Adesivos. In: IWAKIRI, S. (Ed.). **Painéis de madeira reconstituída**. Curitiba: Editora – Fundação de Pesquisas Florestais do Paraná, 2005, cap. 1, p. 13 – 31.
- ALZATE, S.B.A. **Caracterização da madeira de árvores de clones de *Eucalyptus grandis*, *E. saligna* e *E. grandis x urophylla***. 2004. 132 p. Tese (Doutorado em Tecnologia de Produtos Florestais) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2004.
- BASILE, F.C.; MUSSELMAN, R.L. Energy considerations in fiberboard manufacture. In: WASHINGTON STATE UNIVERSITY INTERNATIONAL PARTICLEBOARD COMPOSITE MATERIALS SERIES SYMPOSIUM, 9., 1985. Washington. **Proceedings...** Washington, 1985, p. 26 – 28.
- 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.
- BANCO NACIONAL DE DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO E SOCIAL. Área de Setores Produtivos 1. **Painéis de Madeira Reconstituída**. Brasília: BNDES, 2002, 22 p.
- BRASIL, A.A. **As exportações brasileiras de painéis de madeira**. 2002. 74 p. Dissertação (Mestrado na Área Economia e Política Florestal) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2002.

CARVALHO, A.M. **Valorização da madeira do híbrido *Eucalyptus grandis x urophylla* através da produção conjunta de madeira serrada em pequenas dimensões, celulose e lenha.** 2000. 128p. Dissertação (Mestrado em Tecnologia de Produtos Florestais) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2000.

CASEY, J.P. (Ed.). **Pulp and paper: chemistry and chemical technology.** 3rd ed. London: A Wiley-Interscience Publication, 1980, v.1, 820 p.

CHAPMAN, K.M.; JORDAN, P.J. **Optimising blowline resin blending in MDF manufacture.** Christchurch: MDF Tech and University of Canterbury, 2002, p. 1 – 11.

DEMUTH. Picador a disco. **Picador a disco inclinado.** Disponível em: <http://www.demuth.com.br/portugues/produtos/index.html> Acesso em: 23 jan. 2007.

DURATEX. **Medidas microscópicas do comprimento das fibras retidas em cada peneira do Bauer McNett.** Jundiaí, 1968. 5 p.

DURATEX. **Market share painéis.** Jundiaí, 2006. 7 p.

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.

GOMIDE, J.L.; COLODETTE, J.L. **Estrutura anatômica e química da madeira.** Apostila do Curso de Pós Graduação *Lato Sensu* em Tecnologia de Celulose e Papel. Viçosa: UFV, 2002, 1 v.

GROOM, L.; SO, C.L.; ELDER, T.; PESACRETA, T.; RIALS, T. Effect of refining pressure and resin viscosity on resin flow, distribution, and penetration of MDF fibers. In: PACIFIC RIM BIO-BASED COMPOSITES SYMPOSIUM, 7., 2004, Nanjing. **Proceedings...** Nanjing, 2004. v.1, p. 227 – 239.

GROOM, L.; MOTT, L.; SHALER, S. M.; PESACRETA, T. Effect of fiber surface and mechanical properties on the stiffness and strength of medium density fiberboard. In: Proc. of IAWA/IUFRO International Workshop on the Significance of Microfibril Angle to Wood Quality, 1998, Westport – New Zealand. **Proceedings...** Westport, 1998, p. 375 - 387.

INTERNATIONAL ASSOCIATION OF WOOD ANATOMY (IAWA). List of microscopic features for wood identification. **IAWA Bulletin**, Leiden. v 10, n. 3, p. 226 – 332, 1989.

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.

JOHANSEN, D.A. **Plant microtechnique.** New York: MacGraw-Hill. 1940. 533 p.

KOLLMANN, F.F.P.; KUENZI, E.W.; STAMM, A.J. **Principles of Wood Science and Technology**. v. 2: Wood Based Materials. Berlin: Springer – Verlag, 1975. 703 p.

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

LABOSKY Jr., YOBB, R.D; JANOWIAK, J.J; BLANKENHORN, P.R. Effect of steam pressure refining and resin levels on the properties of UF bonded red maple MDF. **Forest Product Journal**. Madison, v. 43, n. 11/12, p.82-88, Nov/Dec 1993.

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.

MALONEY. T.M. Juvenile wood – Problems in composition board products. In: A TECHNICAL WORKSHOP: JUVENILE WOOD – WHAT DOES IT MEAN TO FOREST MANAGEMENT AND FOREST PRODUCTS, 1985. Washington. **Proceedings ...** Washington: Forest Products Research Society, 1985, p. 72 – 74.

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

MDF YEARBOOK. **Annual Update to the Global MDF Industry**. Dorking, 2005. p. 67 - 69.

METSO PAPER. **Woodhandling – VisiChips**. Disponível em: [http://www.metsopaper.com/MP/Marketing/mpv2store.nsf/BYWID/WID-040630-2256E-5323C/\\$File/MPP_R_0065-02.pdf?openElement](http://www.metsopaper.com/MP/Marketing/mpv2store.nsf/BYWID/WID-040630-2256E-5323C/$File/MPP_R_0065-02.pdf?openElement) Acesso em: 23 jan. 2007.

MORA, A.L.; GARCIA, C.H. **A cultura do eucalipto no Brasil**. São Paulo: SBS, 2000. 112 p.

MYERS, G.C. Relationship of fiber preparation and characteristics to performance of medium-density hardboards. **Forest Products Journal**, Madison, v.33, n.10, p.43-51, Oct. 1983.

NELSON, N.D. Effects of wood and pulp properties on medium density, dry formed hardboard. **Forest Products Journal**, Madison, v.23, n.9, p.72-80, Sep. 1973.

- OLIVEIRA, J.T.S. **Caracterização da madeira de eucalipto para a construção civil.** 1997, 2 v. Tese (Doutorado em Engenharia) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1997.
- PIZZI, A. **Advanced Wood Adhesives Technology.** Nova York: Marcel Dekker, 1994, 289 p.
- 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**, n. 2, p. 19 – 28, 1995.
- RIBEIRO, T.P. **Método complementar de análise da qualidade da madeira com técnicas do processamento digital de imagens.** 2002. 127 p. Tese (Mestrado em Ciências da Computação) – Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2002.
- ROCHA, F.T.; FLORSHEIM, S.M.B.; COUTO, H.T.Z. Variação das dimensões dos elementos anatômicos da madeira de árvores de *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden aos sete anos. **Revista Instituto Florestal**, São Paulo, v.16, n.1, p. 43-55. jun. 2004.
- RODARMEL, J.L. Medium Density Fiberboard Refining. **Better Fibers.** Andritz Sprout-Bauer, Muncy: p. 1 – 8, May 1995.
- Royalplás. WORKSHOP. In: ADESIVOS PARA A INDUSTRIA DA MADEIRA. 2., São Paulo. **Anais ...** Curitiba. Royalplás, 2002. 36 p.
- RUY, O.R; FERREIRA, M.; TOMAZELLO FILHO, M. Variação da qualidade da madeira entre grupos fenotípicos de clones de *Eucalyptus urophylla* S.T. Blake da Ilha de Flores, Indonésia. **Scientia Forestalis.** Piracicaba, n. 60, p. 21 – 27, dez. 2001.
- SASS, J.E. **Botanical microtechnique.** 2nd ed. Iowa: State College Press, 1951. 228 p.
- SHI, J.L.; ZHANG, S.Y; RIEDL, B. Effect of juvenile wood on strength properties and dimensional stability of black spruce medium density fiberboard panels. **Holzforschung**, Berlin. v.59, p.1-9, 2005.
- SILVA, J.C. **Caracterização da madeira de Eucalyptus grandis Hill ex. Maiden, de diferentes idades, visando sua utilização na industria moveleira.** 2002. 160 p. Tese (Doutorado em Ciências Florestais) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2002.
- SMITH, D. M. **Maximum moisture content method for determining specific gravity of small wood samples.** Madison: Forest Products Laboratory , 1954. 8 p. (Report, 2014).
- SUNDIN, B. Resins for the Wood-Based Panels Industry – Current Situation and Future Developments. METSO PANELBOARD, **Panelboard Highlights**, Helsinki, n.1, p. 35 – 39, 2002.

TECHNICAL ASSOCIATION OF THE PULP AND PAPER INDUSTRY. **Fiber length of pulp by classification**. Atlanta: TAPPI, 1975. 1 v.

TOMAZELLO FILHO, M. Estrutura anatômica da madeira de oito espécies de eucalipto no Brasil. **Revista IPEF**. Piracicaba. n. 29, p. 25 – 36, 1985a.

TOMAZELLO FILHO, M. Variação radial da densidade básica e da estrutura anatômica da madeira do *Eucalyptus saligna* e *E. grandis*. **Revista IPEF**, Piracicaba. n. 29, p. 37-45, 1985b.

TOMAZELLO FILHO, M. **Formação e Anatomia da Madeira – Exercícios Práticos**. Apostila de apoio à disciplina Formação e Anatomia da Madeira. Piracicaba. ESALQ/USP, 2002. 76 p.

TOMAZELLO FILHO, M. **Efeito da irrigação e fertilização nas propriedades do lenho de árvores de *Eucalyptus grandis* x *urophylla*** 2006. 146p. Tese (Livre Docência na Especialidade Ciência e Tecnologia de Madeiras) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2006.

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. n. 37, p. 495 – 507, 2004.

WOOD PANEL INDUSTRIES FEDERATION (WPFI). **Information**. Disponível em: <http://www.wpif.org.uk/publications/PressRelease-MDF.pdf> Acesso em: 26 jan. 2007.

WOOD PANEL INDUSTRIES FEDERATION (WPFI). **Wood based panels**. Disponível em: <http://www.wpif.org.uk/publications/IndustryStandard1.pdf> Acesso em: 26 jan. 2007.

ANEXOS

Pré - condição de desfibração	Densidade básica do cavaco	
	amostra	densidade (g/cm ³)
A	A - 1	0,425
	A - 2	0,438
	A - 3	0,421
	A - 4	0,423
	A - 5	0,444
	A - 6	0,440
B	B - 1	0,435
	B - 2	0,436
	B - 3	0,424
	B - 4	0,434
	B - 5	0,431
	B - 6	0,431
C	C - 1	0,441
	C - 2	0,436
	C - 3	0,442
	C - 4	0,427
	C - 5	0,424
	C - 6	0,428

ANEXO A - Densidade básica dos cavacos de madeira de eucalipto submetidos a três condições prévias de desfibramento.

Pré - condição de desfibração	amostra	Abertura da peneira (mm) / % retenção de cavacos de madeira					
		40	25	16	8	3,35	Fundo
A	1	2,9	23,4	33,7	31,8	7,1	0,9
	2	---	---	---	---	---	---
	3	0,0	17,6	46,8	28,0	6,6	0,9
	4	1,2	21,1	43,3	27,8	5,5	0,9
	5	0,0	12,0	50,2	30,4	6,5	0,9
	6	1,5	16,3	47,8	28,7	4,9	0,7
B	1	0	14,1	48,5	31,9	4,5	0,7
	2	0,9	13,8	41,6	36,1	6,3	0,9
	3	0	17,3	40,2	35,1	6,3	0,9
	4	0	17,3	44,5	30,6	6,3	1,2
	5	2,1	15,7	49,4	28,1	3,8	0,7
	6	0,6	15,5	44,4	31,2	7,4	0,8
C	1	0	12,9	40,5	35,7	9,4	1,5
	2	2,1	10,2	35,1	39,9	10,4	2,2
	3	0	15,8	49,6	28,5	5,2	0,7
	4	4,3	15,8	50	25,2	3,9	0,6
	5	0	14,9	54,3	26,1	4,1	0,5
	6	0	15,3	42,1	33,6	7,8	1,2

ANEXO B – Percentual de retenção dos cavacos de eucalipto em peneira vibratória, por pré – condição de desfibramento.

Pré - condição de desfibração	Espessura do cavaco de madeira	
	Amostra	Espessura (mm)
A	A - 1	4,25
	A - 2	4,50
	A - 3	4,37
	A - 4	4,57
	A - 5	4,16
	A - 6	4,56
B	B - 1	4,30
	B - 2	4,20
	B - 3	4,46
	B - 4	4,49
	B - 5	3,93
	B - 6	4,48
C	C - 1	4,02
	C - 2	3,90
	C - 3	4,64
	C - 4	4,34
	C - 5	4,50
	C - 6	4,43

ANEXO C – Espessura dos cavacos utilizados, por amostra e pré-condição de desfibramento.

Pré - condição desfibração	Amostra	Abertura de peneira (mesh) / % retenção de fibras				
		20	35	65	150	< 150
A	1	25,8	24,7	27,5	13,2	8,8
	2	25,4	24,6	26,9	12,2	10,9
	3	25,5	24,3	27,2	12,7	10,3
	4	23,9	24,0	27,5	12,0	12,6
	5	24,1	23,4	28,5	10,4	13,7
	6	24,4	24,1	27,9	12,2	11,4
B	1	46,6	13,6	17,1	10,5	12,1
	2	48,1	12,6	18,7	10,6	9,9
	3	46,4	13,4	19,9	11,7	8,5
	4	46,5	14,2	17,4	12,5	9,4
	5	46,4	13,9	18,7	11,0	10,0
	6	45,7	13,6	18,2	10,8	11,6
C	1	21,4	21,2	30,7	14,9	11,8
	2	21,0	20,7	31,1	14,5	12,7
	3	20,9	21,4	31,4	14,5	11,8
	4	21,3	21,7	30,5	14,4	12,1
	5	20,8	20,3	31,2	14,6	13,1
	6	20,4	20,9	31,6	15,0	12,1

ANEXO D – Percentagem de retenção de fibras de cavacos de madeira de eucalipto, submetidos a três diferentes tratamentos de desfibramento, em 4 diferentes peneiras.

Condição	Repetição	Dens.	MOR	MOE	Tração	Trac Sup	Paraf. Topo	Paraf. Face	Inch.	Abs.
		kg/m ³	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²	kgf	kgf	%	%
A	A2	706	44,6	4301	0,99	2,27	135	126	6,1	34,4
	A3	703	45,7	4305	1,01	2,44	135	126	5,9	33,8
	A4	702	44,0	4244	0,99	2,49	135	125	5,3	32,8
B	B2	687	39,9	3832	0,95	2,21	153	135	5,1	27,4
	B3	698	41,5	3936	0,98	2,32	148	128	5,1	25,3
	B4	693	40,6	3962	0,96	2,17	139	124	5,1	25,4
C	C2	706	41,3	4000	0,84	1,77	108	123	8,5	40,2
	C3	701	39,1	3833	0,73	1,70	108	116	8,4	40,4
	C4	699	39,8	3842	0,74	1,57	108	125	9,0	44,8

ANEXO E - Qualidade tecnológica dos painéis MDF confeccionados em linha de produção, com valores médios por repetição.

Condição	Repetição	Dens.	MOR	MOE	Tração	Trac Sup	Paraf. Topo	Paraf. Face	Inch.	Abs.
		kg/m ³	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²	kgf	kgf	%	%
A	A2	685	35,0	3698	0,92	2,40	127	122	9,4	57,6
	A3	697	33,6	3672	0,93	1,64	139	122	8,5	49,7
	A4	717	37,6	3758	1,18	1,98	140	132	10,5	60,0
	A5	683	38,3	3976	1,02	2,09	139	128	9,4	57,1
B	B2	697	30,2	3537	0,95	1,82	152	131	7,0	37,2
	B3	701	32,7	3629	0,91	2,30	139	137	6,4	33,3
	B4	701	30,0	3636	1,01	2,29	165	152	7,2	39,0
	B5	706	34,1	3848	1,08	2,08	141	144	6,7	35,7
C	C2	681	35,0	3855	0,69	1,22	95	101	14,4	67,3
	C3	686	29,7	3577	0,82	1,23	100	88	15,4	77,4
	C4	686	28,4	3454	0,66	1,48	105	83	13,4	61,2
	C5	707	32,6	3930	0,92	1,50	127	110	14,6	69,2

ANEXO F - Qualidade tecnológica dos painéis MDF confeccionados em laboratório, com valores médios por repetição.