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

Caracterização anatômica da matéria-prima e avaliação das propriedades tecnológicas de painéis MDF de madeira de *Schizolobium amazonicum* Huber ex Ducke e de resíduos de espécies da Amazônia

Victor Cezar Nepomuceno Ribeiro

Dissertação apresentada para obtenção do título de
Mestre em Ciências, Programa: Recursos Florestais.
Opção em: Tecnologia de Produtos Florestais

**Piracicaba
2015**

Victor Cezar Nepomuceno Ribeiro
Engenheiro Florestal

**Caracterização anatômica da matéria-prima e avaliação das propriedades tecnológicas
de painéis MDF de madeira de *Schizolobium amazonicum* Huber ex Ducke e de resíduos
de espécies da Amazônia**

versão revisada de acordo com a resolução CoPGr 6018 de 2011

Orientador:
Prof. Dr. **GERALDO BORTOLETTO JÚNIOR**

Dissertação apresentada para obtenção do título de
Mestre em Ciências, Programa: Recursos Florestais.
Opção em: Tecnologia de Produtos Florestais

Piracicaba
2015

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
DIVISÃO DE BIBLIOTECA - DIBD/ESALQ/USP

Ribeiro, Victor Cezar Nepomuceno

Caracterização anatômica da matéria-prima e avaliação das propriedades tecnológicas de painéis MDF de madeira de *Schizolobium amazonicum* Huber ex Ducke e de resíduos de espécies da Amazônia / Victor Cezar Nepomuceno Ribeiro. - - versão revisada de acordo com a resolução CoPGr 6018 de 2011. - - Piracicaba, 2015.

122 p. : il.

Dissertação (Mestrado) - - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz".

1. Painéis de fibras de média densidade 2. Espessura do painel 3. Proporção de mistura de fibras 4. Propriedades físico-mecânicas I. Título

CDD 674.835
R484c

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

DEDICATÓRIA

À Deus

Aos meus pais Edmilson e Edna Ribeiro

A minha irmã Stephany Victoria

Ao meu amor, Aline Costa

COM AMOR, DEDICO

AGRADECIMENTOS

A minha Mãe, pelo seu cuidado e dedicação, que deram em alguns momentos, a esperança para seguir. Ao meu Pai, pela sua presença que significou segurança e certeza de que não estou sozinho nessa caminhada. A minha irmã, pelo incentivo dado nesta trajetória.

À Aline G. Costa, pela paciência, incentivo, força e principalmente pelo carinho. Apesar de toda distância e tempo. Valeu a pena esperar. Estamos colhendo, juntos, o fruto de nosso empenho.

À Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz – ESALQ/USP, pela oportunidade oferecida para realização do mestrado.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pela concessão da bolsa de estudo.

Ao professor Geraldo Bortoletto Júnior, pela paciência na orientação, incentivo e amizade que tornaram possível a conclusão desta dissertação.

À Floraplaç MDF, pelo fornecimento dos cavacos, fibras e painéis MDF utilizados nessa dissertação. Ao Gerente Geral Rogerio Wosniak, pelo total apoio para a coleta e envio da matéria-prima. À analista do Laboratório de Qualidade Kirley S. do Carmo e ao Engenheiro de Processo Bruno R. B. Oliveira. Ao técnico Jailton Freitas, pelo auxílio nas coletas dos materiais e amizade.

Ao professor Mario Tomazello Filho, pelas importantes contribuições dadas para a melhoria desse estudo e disponibilização da estrutura para a caracterização anatômica e densitometria de raio-X dos painéis MDF.

Aos demais professores do Departamento de Ciências Florestais que contribuíram com a melhoria desta dissertação.

Aos técnicos Alex Canale, Maria Aparecida Rizzato Chavez Bermudez e Luiz Eduardo Facco, pelo auxílio nas etapas experimentais e pela amizade.

Aos amigos do Programa de Pós-Graduação em Recursos Florestais, em especial à Ariel Andrade, Paula Surdi, Saly Takeshita, Vinicius Castro, Ivanka Oliveira, Mariana Pires, Matheus Chagas, Tiago Segura, Magnus Alan Vivian, Eraldo Bonfatti Júnior.

Ao pesquisador Osmar Aguiar, da Embrapa Amazônia Oriental, pelo inestimado auxílio e incentivo para o meu ingresso ao curso de mestrado.

Aos amigos de república João Paulo Francisco, Hermes Soares, Ananias Junior, e Thiago Tonieto, pelos grandes momentos juntos.

SUMÁRIO

RESUMO	9
ABSTRACT	11
LISTA DE FIGURAS	13
LISTA DE TABELAS	15
1 INTRODUÇÃO	15
2 OBJETIVOS	25
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	27
3.1 Características gerais do <i>Schizolobium amazonicum</i> Huber ex Ducke	27
3.2 A importância dos resíduos madeireiros	29
3.3 Painéis MDF	31
3.3.1 Conceito, vantagens e utilização dos painéis MDF	31
3.3.2 Fatores que influenciam as propriedades dos painéis MDF	34
3.3.2.1 Espécie	34
3.3.2.2 Densidade da madeira	36
3.3.2.3 Teor de extrativos e pH da madeira	38
3.3.2.4 Teor de casca	39
3.3.2.5 Processo de desfibramento dos cavacos	40
3.3.2.6 Adesivo	42
3.3.2.7 Catalisador	44
3.3.2.8 Emulsão de parafina	44
3.3.2.9 Teor de umidade do colchão	45
3.3.2.10 Ciclo de prensagem	46
3.3.2.11 Teor de umidade do painel	47
3.3.2.12 Densidade do painel	48
4 MATERIAL E MÉTODOS	51
4.1 Matéria-prima	51
4.1.1 Obtenção e coleta dos cavacos de madeira	52
4.1.2 Caracterização dos cavacos de madeira	53
4.1.2.1 Densidade básica	53
4.1.2.2 Mensuração das dimensões das fibras inteiras dos cavacos	54
4.1.3 Coleta e mensuração das dimensões das fibras após o desfibramento industrial	55

4.2	Manufatura dos painéis MDF	55
4.2.1	Condições de desfibramento dos cavacos	56
4.2.2	Aplicação de adesivo e parafina sobre as fibras	56
4.2.3	Secagem das fibras	56
4.2.4	Formação do colchão de fibras e prensagem	57
4.2.5	Coleta dos painéis MDF	58
4.3	Climatização dos painéis MDF	58
4.4	Obtenção dos corpos-de-prova e avaliação das propriedades tecnológicas.....	58
4.5	Determinação do perfil de densidade dos painéis MDF	60
4.6	Determinação da razão de compactação dos painéis MDF	61
4.7	Tratamentos adotados e análise dos dados experimentais	61
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	63
5.1	Avaliação dos cavacos	63
5.1.1	Densidade básica dos cavacos	63
5.1.2	Dimensões das fibras obtidas dos cavacos	65
5.2	Caracterização das fibras após o desfibramento industrial	68
5.3	Propriedades tecnológicas dos painéis.....	70
5.3.1	Massa específica dos painéis MDF	70
5.3.2	Razão de compactação dos painéis MDF	72
5.3.3	Perfil de densidade dos painéis MDF	73
5.3.4	Absorção de água.....	79
5.3.5	Inchamento em espessura	81
5.3.6	Módulo de ruptura à flexão estática	83
5.3.7	Módulo de elasticidade à flexão estática	86
5.3.8	Ligação interna	88
5.3.9	Resistência ao arranque de parafuso no topo.....	91
5.3.10	Resistência ao arranque de parafuso na face	93
6	CONCLUSÕES.....	93
	REFERÊNCIAS	99
	ANEXOS	111

RESUMO

Caracterização anatômica e propriedades tecnológicas de painéis MDF de madeira de *Schizolobium amazonicum* Huber ex Ducke e de resíduos de espécies da Amazônia

Estudos sobre a qualidade tecnológica de painéis MDF produzidos a partir de madeiras nativas da Amazônia ainda são escassos. O presente estudo teve como objetivo principal determinar a qualidade de painéis MDF produzidos com a madeira de *Schizolobium amazonicum* Huber ex Ducke, em forma de resíduos de lâminas e toras (LAM e TOR, respectivamente), e resíduos de espécies nativas da Amazônia (MIX). A partir destas matérias-primas foram produzidos cavacos, fibras e painéis MDF numa unidade industrial de MDF. Na manufatura dos painéis foram adotados 06 tratamentos. Os tratamentos adotados foram analisados por meio de 03 experimentos independentes: Experimento 1 - verificar o efeito da proporção de matéria-prima (25% TOR -75% MIX; 40% LAM - 75% MIX; 40% LAM - 60% MIX) nas propriedades físicas e mecânicas dos painéis; Experimento 2 - para verificar o efeito da espessura (12 e 15 mm) nas propriedades físicas e mecânicas dos painéis; Experimento 3 - também para verificar o efeito da espessura (15 e 18 mm) nas propriedades físicas e mecânicas dos painéis. Os painéis MDF foram colados com 13% de resina a base de ureia-formaldeído e 0,7% de emulsão de parafina. Posteriormente, corpos-de-prova foram obtidos dos painéis MDF para avaliação da massa específica, teor de umidade, absorção de água, inchamento em espessura, módulo de ruptura, módulo de elasticidade, resistência da ligação interna, resistência ao arracamento de parafuso na face e no topo, conduzidos conforme a norma NBR 15316 (ABNT, 2009). Adicionalmente, foi realizada a caracterização das fibras de TOR, LAM e MIX antes e após o desfibramento industrial dos cavacos e determinado o perfil de densidade dos painéis por meio da técnica de atenuação de raios-X. Para verificar o efeito das variáveis sobre as propriedades das chapas MDF foi realizada uma análise de variância e, posteriormente, o teste de *Tukey*, conduzido ao nível de 5% de probabilidade de erro. Mediante a análise dos resultados dos ensaios, concluiu-se que: No Experimento 1, os painéis MDF manufaturados com a mistura de fibras das madeiras na proporção B apresentaram melhor desempenho nas propriedades de APT e APF, e os painéis na proporção C desempenho superior no MOR. No Experimento 2, os painéis de 12 mm mostraram melhor desempenho nas propriedades de LI e APF, e os painéis de 15 mm melhor desempenho em AA2h, AA24h e IE24h; No Experimento 3, os painéis MDF de 18 mm exibiram melhor desempenho nas propriedades de IE2h, IE24h, MOR e MOE à flexão estática. Os painéis de 15 mm tiveram melhor desempenho nas propriedades de APT e APF. Com exceção dos valores da propriedade de LI, todos os painéis MDF avaliados no presente estudo atenderam aos valores requeridos pela norma NBR 15316-2 (ABNT, 2009), para fabricação de móveis a serem utilizados em condições secas.

Palavras-chave: Painéis de fibras; Espessura do painel; Proporção de mistura de fibras; Propriedades físico-mecânicas

ABSTRACT

Anatomical characterization and evaluation of technological properties MDF manufactured from wood *Schizolobium amazonicum* Huber ex Ducke and waste native species of the Amazon

Studies about the technological quality of MDF manufactured with wood of native species from Amazon are scarce. This study aimed to evaluate the quality of MDF produced with wood *Schizolobium amazonicum* Huber ex Ducke, waste of veneer and log (LAM and TOR, respectively) and waste of native species from Amazon (MIX). The chips, fibers and MDF, from this material, were produced in an industrial unit MDF. In the manufacture of panels 06 treatments were adopted. The following treatments were analyzed by 03 independent experiments: Experiment 1 – to verify the effect of the proportion of raw material (25% -75% TOR MIX; LAM 40% - 75% MIX; LAM 40% - 60% MIX) on the physical and mechanical properties of the panels; Experiment 2 - to verify the effect of thickness (12 and 15 mm) on the physical and mechanical properties of the panels; Experiment 3 – also, to verify the effect of the thickness (15 and 18 mm) on the physical and mechanical properties of the panels. The MDF panels were bonded with 13% of resin based on urea formaldehyde and 0.7% paraffin emulsion. Posteriorly, samples were obtained to conduct the moisture content, bulk density, water absorption and thickness swelling, modulus of rupture, modulus of elasticity, internal bonding, resistance to face screw-holding and edge screw-holding, tests according to NBR 15316 (ABNT, 2009). Additionally, was characterized the TOR, LAM and MIX fibers, performed before and after industrial refining chip and determined the density profile of the MDF using the technique of X-ray attenuation. To check the effect of variables on the properties of MDF an analysis of variance was performed, and subsequently the Tukey test, conducted at the 5% level of error probability. Through the analysis of tests results it was conclude: In Experiment 1, MDF panels manufactured with a mixture of wood fiber in the ratio B showed better performance in the properties of APT and APF, and the panels in C ratio showed superior performance in MOR. In Experiment 2, the panels of 12 mm showed better performance in the properties of LI and APF, and 15 mm panels perform better in AA2h, AA24h and IE24H; In Experiment 3, the panels of 18 mm panels exhibited better performance on the properties of IE2h, IE24h, MOR and MOE in static bending. 15 mm panels outperformed the properties of APT and APF. With the exception of property values LI, all MDF panels evaluated in this study met the required values by NBR 15316-2 (ABNT, 2009), for the manufacture of furniture to be used in dry conditions.

Keywords: Fiberboard; Panel thickness; Mixing ratio of fibers; Physical-mechanical properties

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – (A) Árvore de <i>Schizolobium amazonicum</i> ; (B) folhas; (C) flores. Fonte: CIFlorestas, 2013.....	27
Figura 2 - Resíduos provenientes do processamento primário e secundário da madeira.	29
Figura 3- Cavacos de madeira utilizados para a manufatura dos painéis MDF; (A) Cavacos de MIX; (B) Cavacos de TOR; (C) Cavacos de LAM.....	52
Figura 4 - Ciclo de prensagem dos painéis MDF.....	57
Figura 5 - Esquema da retirada dos corpos-de-prova retirados dos painéis MDF. Legenda: APF = Arranque de Parafuso na Face; APT = Arranque de Parafuso no Topo; LI = Ligação Interna; ABS/INC = Absorção de água e Inchamento em espessura; TU = Teor de umidade; ME = Massa Específica Aparente; PD = Perfil de densidade.	59
Figura 6 – Exemplo de perfil de densidade do painel MDF: Camada Externa (a); e camada central (b).....	60
Figura 7 – Fibras inteiras provenientes dos cavacos de madeira; (A) Parede celular e lume das fibras de LAM (400 x; barra: 100 µm); (B) Parede celular e lume das fibras de TOR (400 x; barra: 100 µm); (C) Parede celular e lume das fibras de MIX (400 x; barra: 100 µm); (D) Comprimento das fibras de LAM (25 x; barra: 500 µm); (E) Comprimento das fibras de TOR (25 x; barra: 500 µm); (F) Comprimento das fibras de MIX (25 x; barra: 500 µm).....	66
Figura 8 – Fibras obtidas após o desfibramento industrial; (A) Fibra quebrada no centro; (B) Fibra quebrada em sua extremidade.	70
Figura 9 - Perfil de densidade dos tratamentos. (A) Tratamento 1; (B) Tratamento 2; (C) Tratamento 3; (D) Tratamento 4; (E) Tratamento 5; (F) Tratamento 6.....	74
Figura 10 – Feixes de fibras presentes na camada central de um corpo-de-prova de um painel MDF rompido por tração perpendicular ao plano após o ensaio de ligação interna	91

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Tratamentos utilizados na manufatura das chapas MDF	61
Tabela 2 - Valores médios da densidade básica dos cavacos de TOR, LAM e MIX.....	63
Tabela 3 - Valores médios da densidade básica da mistura dos cavacos de TOR, LAM e MIX nas proporções A, B, C e D	64
Tabela 4 - Valores médios do comprimento, largura, diâmetro do lume e espessura da parede celular das fibras inteiras dos cavacos de madeira de TOR, LAM e MIX	65
Tabela 5 - Dimensões das fibras de madeira de <i>Schizolobium amazonicum</i> encontrados na literatura.....	67
Tabela 6 – Valores médios do comprimento, largura, diâmetro do lume e espessura da parede celular das fibras após o desfibramento industrial dos cavacos	68
Tabela 7 - Distribuição das frequências absoluta (ABS) e relativa (REL) do comprimento das fibras da mistura de TOR, LAM e MIX nas proporções A, B, C e D, após o desfibramento industrial dos cavacos.....	69
Tabela 8 - Valores médios da massa específica dos painéis MDF do Experimento 1	70
Tabela 9 - Valores médios da massa específica dos painéis MDF do Experimento 2	71
Tabela 10 - Valores médios da massa específica dos painéis MDF do Experimento 3	71
Tabela 11 - Valores das razões de compactação nominal e efetiva dos painéis MDF.....	72
Tabela 12 - Valores médios de massa específica da camada externa e camada central dos painéis MDF do Experimento 1.....	76
Tabela 13 - Valores médios de massa específica da camada externa e camada central dos painéis MDF do Experimento 2.....	77
Tabela 14 - Valores médios de massa específica da camada externa e camada central dos painéis MDF do Experimento 3.....	77
Tabela 15 - Valores médios de absorção de água dos painéis MDF do Experimento 1	79
Tabela 16 - Valores médios de absorção de água dos painéis MDF do Experimento 2	79
Tabela 17 - Valores médios de absorção de água dos painéis MDF do Experimento 3	80
Tabela 18 - Valores médios de inchamento em espessura dos painéis MDF do Experimento 1	81
Tabela 19 - Valores médios de inchamento em espessura dos painéis MDF o Experimento 2	82
Tabela 20 - Valores médios de inchamento em espessura dos painéis MDF do Experimento 3	82

Tabela 21 - Valores médio de módulo de ruptura a flexão estática dos painéis MDF do Experimento 1	83
Tabela 22 - Valores médio de módulo de ruptura a flexão estática dos painéis MDF do Experimento 2.....	84
Tabela 23 - Valores médio de módulo de ruptura a flexão estática dos painéis MDF do Experimento 3.....	85
Tabela 24 - Valores médios para o módulo de elasticidade à flexão estática dos painéis MDF do Experimento 1	86
Tabela 25 - Valores médios para o módulo de elasticidade à flexão estática dos painéis MDF do Experimento 2.....	86
Tabela 26 - Valores médios para o módulo de elasticidade à flexão estática dos painéis MDF do Experimento 3.....	87
Tabela 27 - Valores médios de ligação interna dos painéis MDF do Experimento 1	88
Tabela 28 - Valores médios de ligação interna dos painéis MDF do Experimento 2.....	88
Tabela 29 - Valores médios de ligação interna dos painéis MDF do Experimento 3.....	89
Tabela 30 - Valores médios de resistência ao arranque de parafuso no topo dos painéis MDF do Experimento 1	91
Tabela 31 - Valores médios de resistência ao arranque de parafuso no topo dos painéis MDF do Experimento 3.....	92
Tabela 32 - Valores médios de resistência ao arranque de parafuso na face dos painéis MDF do Experimento 1	93
Tabela 33 - Valores médios de resistência ao arranque de parafuso na face dos painéis MDF do Experimento 2.....	94
Tabela 34 - Valores médios de resistência ao arranque de parafuso na face dos painéis MDF do Experimento 3.....	94
Tabela 35 - Análise de variância dos fatores de tratamento para a variável densidade básica das madeiras.....	113
Tabela 36 - Análise de variância dos valores de tratamento para a variável comprimento das fibras de cavacos.....	113
Tabela 37 - Análise de variância dos valores de tratamento para a variável largura das fibras de cavacos	113
Tabela 38 - Análise de variância dos valores de tratamento para a variável diâmetro do lume das fibras de cavacos.....	113

Tabela 39 - Análise de variância dos valores de tratamento para a variável espessura da parede celular das fibras de cavacos	114
Tabela 40 - Análise de variância dos valores de tratamento para a variável massa específica do Experimento 1	114
Tabela 41 - Análise de variância dos valores de tratamento para a variável massa específica do Experimento 2	114
Tabela 42 - Análise de variância dos valores de tratamento para a variável massa específica do Experimento 3	114
Tabela 43 - Análise de variância dos valores de tratamento para a variável massa específica da camada externa dos painéis MDF, obtidos pelo perfil de densidade, realizada do Experimento 1	115
Tabela 44 - Análise de variância dos valores de tratamento para a variável massa específica da camada central dos painéis MDF, obtidos pelo perfil de densidade, realizada do Experimento 1	115
Tabela 45 - Análise de variância dos valores de tratamento para a variável massa específica da camada externa, dos painéis MDF, obtidos pelo perfil de densidade, realizada do Experimento 2	115
Tabela 46 - Análise de variância dos valores de tratamento para a variável massa específica da camada central dos painéis MDF, obtidos pelo perfil de densidade, realizada do Experimento 2	115
Tabela 47 - Análise de variância dos valores de tratamento para a variável massa específica da camada externa dos painéis MDF, obtidos pelo perfil de densidade, realizada do Experimento 3	116
Tabela 48 - Análise de variância dos valores de tratamento para a variável massa específica da camada central dos painéis MDF, obtidos pelo perfil de densidade, realizada do Experimento 3	116
Tabela 49 - Análise de variância dos valores de tratamento para a variável absorção de água em duas horas do Experimento 1	116
Tabela 50 - Análise de variância dos valores de tratamento para a variável absorção de água em vinte e quatro horas do Experimento 1	116
Tabela 51 - Análise de variância dos valores de tratamento para a variável absorção de água em duas horas do Experimento 2	117
Tabela 52 - Análise de variância dos valores de tratamento para a variável absorção de água em vinte e quatro horas do Experimento 2	117

Tabela 53 - Análise de variância dos valores de tratamento para a variável absorção de água em duas horas do Experimento 3	117
Tabela 54 - Análise de variância dos valores de tratamento para a variável absorção de água em vinte e quatro horas do Experimento 3	117
Tabela 55 - Análise de variância dos valores de tratamento para o inchamento em espessura em duas horas do Experimento 1	118
Tabela 56 - Análise de variância dos valores de tratamento para o inchamento em espessura em vinte e quatro horas do Experimento 1	118
Tabela 57 - Análise de variância dos valores de tratamento para o inchamento em espessura em duas horas do Experimento 2	118
Tabela 58 - Análise de variância dos valores de tratamento para o inchamento em espessura em vinte e quatro horas do Experimento 2	118
Tabela 59 - Análise de variância dos valores de tratamento para o inchamento em espessura em duas horas do Experimento 3	119
Tabela 60 - Análise de variância dos valores de tratamento para o inchamento em espessura em vinte e quatro horas do Experimento 3	119
Tabela 61 - Análise de variância dos valores de tratamento para o módulo de ruptura à flexão estática do Experimento 1	119
Tabela 62 - Análise de variância dos valores de tratamento para o módulo de ruptura do Experimento 2	119
Tabela 63 - Análise de variância dos valores de tratamento para o módulo de ruptura do Experimento 3	120
Tabela 64 - Análise de variância dos valores de tratamento para o módulo de elasticidade do Experimento 1	120
Tabela 65 - Análise de variância dos valores de tratamento para o módulo de elasticidade do Experimento 2	120
Tabela 66 - Análise de variância dos valores de tratamento para o módulo de elasticidade do Experimento 3	120
Tabela 67 - Análise de variância dos valores de tratamento para ligação interna do Experimento 1	121
Tabela 68 - Análise de variância dos valores de tratamento para ligação interna do Experimento 2	121
Tabela 69 - Análise de variância dos valores de tratamento para ligação interna do Experimento 3	121

Tabela 70 - Análise de variância dos valores de tratamento para arranque de parafuso no topo do Experimento 1	121
Tabela 71 - Análise de variância dos valores de tratamento para arranque de parafuso no topo do Experimento 3	122
Tabela 72 - Análise de variância dos valores de tratamento para arranque de parafuso na face do Experimento 1	122
Tabela 73 - Análise de variância dos valores de tratamento para arranque de parafuso na face do Experimento 2	122
Tabela 74 - Análise de variância dos valores de tratamento para arranque de parafuso na face do Experimento 3	122

1 INTRODUÇÃO

O MDF (*Medium Density Fiberboard*) é um painel composto por fibras com umidade inferior a 20 % na linha de formação, sendo consolidado sob a ação de calor e pressão e com adição de resina sintética, água, catalizador e emulsão de parafina (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TECNICAS - ABNT, 2009; WOOD PANEL INDUSTRIES FEDERATION - WPIF, 2012). Adicionalmente, há possibilidade de serem acrescentados aditivos químicos para promover a melhoria de certas características do painel, tais como a resistência à umidade, ao fogo e deterioração biológica (FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION - FAO, 1953).

Por ser composto por fibras individualizadas e com disposição aleatória em seu plano, o painel MDF apresenta vantagens relacionadas à sua estrutura homogênea, tais como boa trabalhabilidade (usinagem de superfície; bordas e cantos; torneamento; perfuração) e alta qualidade no acabamento, além de possuir superfície adequada para receber aplicação de diferentes tipos de revestimento (IWAKIRI et al., 2005; TORQUATO, 2008). Os painéis MDF são aplicados no setor moveleiro e na construção civil, especialmente nos casos que exigem entalhes e adornos (BENADUCE, 1998).

Devido a uma alta gama de aplicações e grande aceitabilidade no mercado, o MDF tornou-se um dos painéis mais produzidos e comercializados no mundo. Os painéis MDF têm como principal fonte de matéria-prima a madeira, a partir de toras ou certos resíduos madeireiros (IWAKIRI et al., 2005). De modo geral, os painéis a base de madeira servem como produto alternativo aos materiais metálicos e poliméricos (petroquímicos) com propósito de construção e fabricação de bens de consumo (EMERSON, 2010).

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

Apesar de ser uma fonte renovável, há uma tendência geral de escassez de madeira, e juntamente com o aumento do custo de produção, torna-se necessário para a indústria de painéis de madeira procurar formas inovadoras de utilização de recursos florestais. Por isso, há esforços para encontrar espécies nativas que produzam madeira de qualidade, em grande quantidade e com características de crescimento desejáveis, para suprir a demanda por matéria-prima, diminuindo a dependência das principais espécies utilizadas no processo, tais

como as dos gêneros *Pinus* e o *Eucalipto*. Na Região Amazônica, um exemplo de espécie nativa plantada para a produção de madeira em escala comercial, e que vem se destacando nos últimos anos é o *Schizolobium amazonicum* Huber ex Ducke, comercializada em forma de toras inteiras e lâminas de madeira (HOFFMANN et al., 2011). A espécie é conhecida por apresentar uma madeira de baixa massa específica, variando entre 260 e 420 kg/m³ (VIDAURRE et al., 2012; MELO et al., 2013).

Os resíduos madeireiros provenientes de serrarias na Região Amazônica, também, podem constituir uma fonte de matéria-prima alternativa e com grande potencial para a manufatura de painéis MDF, visto que na região há um grande número de serrarias e madeireiras. A maior parte dos resíduos madeireiros é utilizada para a queima, entretanto, para as indústrias madeireiras, o aproveitamento dos resíduos contribui para a redução de áreas de estocagem, diminuem os custos de movimentação, reduzem a poluição ambiental, os custos de produção e aumentam a eficiência na utilização da matéria-prima (GOMES; SAMPAIO, 2004). Algumas espécies madeireiras comercializadas pelas serrarias e madeireiras na Amazônia, tais como, *Lecythis pisonis*, *Couratari macrosperma*, *Manilkara huberi*, *Carapa guianensis*, *Tabebuia serratifolia*, *Dinizia excelsa* e *Hymenaea courbaril*, são conhecidas por suas madeiras serem de média à alta massa específica (MARTINI; ROSA; UHL, 1998; VERISSIMO et al., 2002; SILVA et al., 2007; PEZZUTI; SILVA, 2009).

Segundo Kelly (1977), quando manufaturados na mesma massa específica, painéis produzidos a partir de madeiras de baixa densidade tendem a apresentar alta razão de compactação, melhorando as propriedades mecânicas, porém, a sua estabilidade dimensional será inferior em comparação aos painéis produzidos com madeira de maior densidade.

Diversos autores, como Myers e Crist (1986), Benaduce (1998), Kartal e Green III (2003) e Alpar (2010), realizaram estudos com diversas proporções de misturas de espécies de madeira de diferentes massas específicas, visando identificar aquelas que resultariam em painéis de melhor qualidade. Entretanto, de acordo com Eleotério (2000), além da matéria-prima, os parâmetros de produção são fatores que afetam as características finais do painel MDF, atuando tanto de forma isolada como em conjunto.

A espessura do painel é um dos parâmetros que pode interferir diretamente nas propriedades físicas e mecânicas do MDF, tanto que a NBR 15316-2 (ABNT, 2009) determina os requisitos das propriedades tecnológicas dos painéis MDF por classe de espessura. Entretanto, tal interferência ainda não se encontra totalmente esclarecida.

Alguns autores divergem quanto ao efeito da espessura sobre as propriedades do painel. Días, Velásquez e Quintana (2012), concluíram que o aumento da espessura do painel

resultou em aumento no valor das propriedades de absorção de água e inchamento em espessura e redução nos valores das propriedades de flexão estática e ligação interna. De outro lado, Krzysik et al. (2001), verificaram que o aumento da espessura dos painéis resultou em redução dos valores de absorção de água e inchamento em espessura e aumento nos valores de flexão estática e ligação interna.

Considerando que estudos sobre o comportamento de painéis MDF manufaturados a partir da mistura de madeiras de espécies amazônicas ainda são escassos, bem como que ainda não se encontra bem esclarecida a influência da espessura do painel sobre as suas propriedades, surgiu a proposta do presente estudo visando gerar subsídios que possam contribuir para um melhor entendimento dessas questões.

2 OBJETIVOS

O presente trabalho teve como objetivo principal avaliar as propriedades tecnológicas de painéis MDF manufaturados com as madeiras de *Schizolobium amazonicum* Huber ex Ducke e de resíduos de espécies nativas da Amazônia. Os objetivos específicos foram os seguintes:

- I) Avaliar a densidade básica dos cavacos das madeiras;
- II) Caracterizar as fibras inteiras obtidas dos cavacos das madeiras;
- III) Caracterizar as fibras das madeiras após o processo de desfibramento industrial dos cavacos;
- IV) Obter e avaliar o perfil de densidade dos painéis MDF;
- V) Avaliar o efeito de diferentes proporções de misturas de fibras das madeiras utilizadas na manufatura dos painéis MDF sobre as propriedades físico-mecânicas;
- VI) Avaliar o efeito da espessura dos painéis MDF sobre as propriedades físico-mecânicas;
- VII) Verificar entre os painéis MDF estudados, quais atendem aos requisitos estabelecidos pela norma NBR 15316-2 (ABNT, 2009).

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Características gerais do *Schizolobium amazonicum* Huber ex Ducke

O *Schizolobium amazonicum* Huber ex Ducke (Figura 1), pertencente à família Fabaceae (Subfamília: Caesalpiniaceae), é uma espécie pioneira que ocorre naturalmente na Amazônia brasileira, venezuelana, boliviana e equatoriana e em toda a América Central, em altitudes de até 800 metros. No Brasil é conhecido vulgarmente como: paricá, bandarria, canafísta, fava-canafístula, faveira ou guapuruvu-da-Amazônia, e é encontrada nos estados do Amazonas, Pará, Mato Grosso, Rondônia e Acre, podendo ocorrer na Mata Atlântica entre Santa Catarina e Bahia (CARVALHO, 1994).

Figura 1 – (A) Árvore de *Schizolobium amazonicum*; (B) folhas; (C) flores. Fonte: CIFlorestas, 2013

A espécie apresenta hábito decíduo, podendo alcançar dimensões próximas de 40 m de altura e 100 cm de DAP (diâmetro a altura do peito, medido a 1,30 m do solo). O fuste é reto e cilíndrico, podendo apresentar sapopemas basais. Apresenta copa galhosa, aberta e obovoide com ramificações dicotômicas, com folhas longipeciouladas, bipinadas e grandes. As flores são zigomorfas com coloração amarelo claro. Os frutos são criptosâmaras de forma

espatulada, oblanceolada e aberta até o ápice. A semente é anátropa, aplanada, ovalada e coberta com um endocarpo papiroso unido apicalmente ao fruto (CARVALHO, 1994).

No início da década de 1970, no Estado do Pará, iniciaram-se estudos sobre a silvicultura do *Schizolobium amazonicum* com o objetivo de diversificar as áreas cultivadas. Os resultados de crescimento apresentados foram determinantes para que fossem instaladas parcelas pilotos com esta e com outras espécies florestais na Mesorregião do Baixo Amazonas, localizada também no Estado do Pará. As participações efetivas de empresas privadas também foram determinantes no desenvolvimento do conhecimento sobre a espécie, registradas desde a década de 1980 (MARQUES; YARED; SIVEIRO, 2006).

O *Schizolobium amazonicum* apresenta grande potencial madeireiro, uma vez que há um crescimento dessa espécie em diâmetro e altura semelhante aos níveis das espécies de rápido crescimento implantadas no Brasil. Possui facilidade na produção, excelente ritmo de crescimento e bom índice de estabelecimento no campo, além de reunir ótimas qualidades silviculturais (MARQUES et al., 2004; HOFFMANN et al., 2011). De acordo com Terezo (2010), as árvores de *Schizolobium amazonicum* são desbastadas e utilizadas para laminação aos 8 anos de idade, sendo que em alguns casos a idade de corte da espécie para a laminação pode ser superior aos 12 anos de idade.

Devido às múltiplas possibilidades de emprego aliada às características silviculturais amplamente favoráveis, o *Schizolobium amazonicum* tornou-se uma das espécies mais plantadas no Estado do Pará (TREMACOLDI; LUNZ; COSTA, 2009). Também, há plantios concentrados nos Estados do Maranhão e Tocantins. A área plantada com a espécie totalizou no Brasil, no ano de 2012, aproximadamente 87.901 ha (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE PRODUTORES DE FLORESTA PLANTADA - ABRAF, 2013).

Em plantios comerciais a produtividade anual do *Schizolobium amazonicum* encontra-se na faixa de 20 a 30 m³/ha/ano, cuja taxa de crescimento é comparável à de espécies exóticas plantadas no Brasil (IWAKIRI et al, 2010). Aos cinco anos de idade, o incremento médio anual da espécie, em diâmetro e volume comercial, pode alcançar 3,3 cm e 31,3 m³/ha/ano, respectivamente (TONINI et al., 2005).

A madeira do *Schizolobium amazonicum* é mole, leve, possui grã direita a irregular, cerne creme-avermelhado e alburno creme claro, com superfície lisa, ligeiramente sedosa. É facilmente processada mecanicamente e permite bom acabamento, mas, possui baixa durabilidade natural, sendo suscetível ao ataque de fungos e insetos xilófagos. A madeira é empregada na fabricação de palitos de fósforo, saltos de calçados, brinquedos, maquetes, embalagens leves, canoas, forros, miolo de painéis e portas, formas de concreto, laminados e

compensados (CARVALHO, 2007). Há registro na literatura sobre o potencial da madeira da referida espécie para outros usos, tais como produção de energia (Vidaurre et al, 2012), painéis de partículas (Colli et al., 2007; Biache et al., 2012), painéis LVL (Iwakiri et al., 2010), papel e celulose (Souza et al, 2003; Silva et al., 2013).

3.2 A importância dos resíduos madeireiros

De acordo com Krzysik, Youngquist e Bowers (1997), a palavra resíduo (*waste*) projeta uma visão sob a qual o material assim denominado não tem valor ou utilidade. No entanto, com a evolução da tecnologia, certos resíduos da madeira podem ser aproveitados, tornando-se matéria-prima para uma série de produtos compostos de alto desempenho.

No setor florestal, os resíduos são provenientes de sobras da colheita florestal e da consequência direta do processamento primário e secundário da madeira (Figura 2), os quais possuem potencial para serem aproveitados (HILLIG et al., 2006; CERQUEIRA et al., 2012). O aproveitamento de resíduos da industrialização da madeira contribui para a racionalização dos recursos florestais, além de representar uma nova alternativa econômica para as empresas (FEITOSA, 2008).

Figura 2 - Resíduos provenientes do processamento primário e secundário da madeira.

Segundo Fontes (1994), os resíduos de madeira podem ser classificados em três tipos distintos: i) serragem - resíduo originado da operação de serras, encontrado em todos os tipos de indústrias madeireiras, à exceção das laminadoras; ii) cepilho - conhecido também por maravalha, resíduo gerado pelas plainas nas instalações de serraria/beneficiamento e beneficiadoras (indústrias que adquirem a madeira já transformada e a processam em componentes para móveis, esquadrias, pisos, forros, etc.); iii) lenha - resíduo de maiores dimensões, gerado em todos os tipos de indústria de processamento primário e secundário da madeira, composto por costaneiras, aparas, refilos, destopo e restos de lâminas.

As indústrias deparam-se, em seus processos produtivos, com volumes cumulativos de resíduos que podem causar impactos ambientais (CASSILHA et al., 2004). A maior parte dos resíduos madeireiros é destinada à queima, contribuindo para geração de CO₂ e exercendo influencia para mudança climática do planeta, agravando problemas de saúde pública (TUOTO, 2009).

Na década de 70, os resíduos de madeira praticamente não eram utilizados na indústria de painéis e, quando utilizados, representavam apenas 15% da matéria-prima consumida. No início da década de 90, o Brasil foi responsável por 4% da produção mundial de toras para serraria e laminação, cujos volumes somados corresponderam a um total de 37.968.000 m³ de madeira. Estima-se que a industrialização desse volume de material resultou na geração de 19.255.000 m³ de resíduos madeireiros, representando 50,71% da matéria-prima original (BRITO, 1995). Estimativas apontam que são gerados, anualmente, 30 milhões de toneladas de resíduos de madeira no Brasil, tendo como principal fonte geradora a indústria madeireira, responsável por 91% do total de resíduos de madeira gerados no País (TUOTO, 2009).

De acordo com Tuoto (2009), as regiões sul e sudeste do País apresentam elevados níveis de aproveitamento dos resíduos madeireiros. O problema está concentrado nos resíduos gerados pela indústria madeireira da Região Amazônica, na qual, alguns aspectos como falta de tecnologia adequada, falta de financiamento e ausência de políticas pública, se tornam barreiras para sua valorização. A maioria dos resíduos de madeira gerados na referida região, por exemplo, são simplesmente abandonados ou queimados sem nenhum fim energético, resultando em danos ambientais irreparáveis e perdas econômicas significativas.

O aproveitamento dos resíduos madeireiros contribui para a redução de áreas de estocagem, diminuem os custos de movimentação, reduzem a poluição ambiental, os custos de produção e aumentam a eficiência na utilização da matéria-prima (GOMES; SAMPAIO, 2004). Alternativas possíveis à destinação dos resíduos de madeira são: compostagem, a

produção de energia, a produção de briquetes, a fabricação de pequenos objetos de madeira e a produção de painéis reconstituídos (SANTOS, 2010).

A utilização dos resíduos madeireiros como matéria-prima para novos produtos contribui significativamente para o desenvolvimento sustentável das industriais de base florestal no longo prazo e para a gestão de ecossistemas florestais, e permitirá, por exemplo, que os mercados de painéis à base de madeira cresçam, minimizando o uso de madeira sólida (KRZYSIK; YOUNGQUIST; BOWERS, 1997). Um exemplo é a produção de painéis de fibras nas indústrias norte-americanas, nas quais, tradicionalmente, utilizam-se resíduos de serrarias, bem como toras de pequenos diâmetros (YE et al., 2007).

Krzysik, Youngquist e Bowers (1997), manufaturando painéis MDF a partir da mistura de 70% de resíduos de madeira e 30% de papel, verificaram que é perfeitamente possível a utilização dos mesmos resíduos como matéria-prima para MDF, especialmente em painéis de 6 mm de espessura.

Onuorah (2005), estudando o potencial do uso de fibras de pecíolos de *Elais guineensis* e um mix de diversas espécies tropicais, provenientes de serrarias para a manufatura de painéis MDF, verificou que os painéis compostos pelo mix de resíduos de madeira apresentaram os desempenhos mais satisfatórios para as propriedades físicas e mecânicas, com exceção do módulo de ruptura.

Iwakiri et al. (2012b), avaliando a qualidade de painéis aglomerados produzidos com resíduos de processamento em serraria das espécies de *Scleronema micranthum* Ducke (Cardeiro), *Ecclinusa guianensis* Eyma (Caucho), *Scleronema* sp. (Castanha-de-paca), *Copaifera multijuga* Hayne (Copaíba), *Ocotea* sp. (Louro), *Ocotea guianensis* Aubl (Louro-espinho), *Caryocar villosum* Pers. (Piquiarana), *Couratari oblongifolia* Ducke & R. Knuth (Tauari) e *Virola surinamensis* Rol. Warb (Virola), indicaram por meio dos resultados de ensaios físicos e mecânicos, que há viabilidade técnica para utilização dessas espécies para produção de painéis de madeira aglomerada.

3.3 Painéis MDF

3.3.1 Conceito, vantagens e utilização dos painéis MDF

A sigla MDF designa um painel de média densidade produzido a partir de fibras de madeira. De acordo com Valença, Roque e Souza (2000), o MDF foi fabricado pela primeira vez no início dos anos 60 nos Estados Unidos. Em meados da década de 70, chegou à Europa,

quando passou a ser produzido na antiga República Democrática Alemã e, posteriormente (1977), foi introduzido na Europa Ocidental através da Espanha. No Brasil, a primeira indústria iniciou sua produção no segundo semestre de 1997.

De acordo com WPIF (2007), os painéis MDF são compostos tipicamente por: 82% de fibras de madeira, 10% de resina sintética, 7% de água e menos de 1% de parafina. Segundo a norma NBR 15316-1 (ABNT, 2009), o MDF é constituído por um colchão de fibras de madeira, que na linha de produção se encontra com teor de umidade menor que 20%, o qual é consolidado por ação de calor, pressão e adesivos sintéticos, resultando numa chapa de densidade igual ou superior a 450 kg/m³. Para fins mercadológicos, a norma citada classifica o painel MDF da seguinte maneira:

- *HDF (High Density Fiberboard)*: chapas com densidade $\geq 800 \text{ kg/m}^3$;
- *Standart*: chapas com densidade $> 650 \text{ Kg/m}^3$ e $< 800 \text{ kg/m}^3$;
- *Light*: chapas com densidade $> 550 \text{ Kg/m}^3$ e $< 650 \text{ kg/m}^3$;
- *Ultra Light*: chapas com densidade $\leq 550 \text{ kg/m}^3$.

De acordo com Belini (2007), a produção de painéis MDF, através do processo de prensagem contínua, pode ser resumida nas seguintes etapas: descascamento de toras; picagem das toras e produção de cavacos; acondicionamento dos cavacos em silo; lavagem dos cavacos; desfibração dos cavacos e produção de fibras; aplicação de adesivo e aditivo sobre as fibras; secagem das fibras; formação do colchão de fibras; prensagem do colchão de fibras; corte do painel contínuo; climatização dos painéis; aplicação de lixa sobre os painéis; resserragem dos painéis; embalagem dos painéis para expedição.

Os produtos derivados de madeira, como o MDF, possuem características que lhes oferecem vantagens em relação a outros materiais de construção, tais como utilizar-se de fontes de matéria-prima renováveis, abundantes na natureza, biodegradáveis, recicláveis e que imobilizam carbono, além de consumirem menor quantidade de energia comparada com produtos de outras origens (ELEOTÉRIO, 2000). Em relação à madeira serrada, apresentam maior rendimento volumétrico, suas dimensões não estão restritas às dimensões dos fustes, agregam valor a materiais de baixa aceitação e suas propriedades finais não são influenciadas pelos defeitos referentes à anatomia da madeira, sendo influenciados, principalmente, pelo processo produtivo (IWAKIRI et al., 2005).

O processo de produção do MDF faz com que o painel possua características que se aproximam às da madeira sólida, com aplicações variadas, sendo considerado um produto que

se situa entre a chapa dura (*hardboard*) e o aglomerado, com propriedades favoráveis e vantajosas (BENADUCE, 1998).

A estrutura dos painéis MDF é altamente homogênea e isotrópica, devido ao uso das fibras de madeira individualizadas e com disposição aleatória em seu plano, oferecendo grandes vantagens na homogeneidade das propriedades (TORQUATO, 2008). Entretanto, por ser um material higroscópico, o painel MDF é dimensionalmente instável, a variação da umidade no ambiente pode ocasionar a redução das propriedades mecânicas do painel MDF, como no módulo de ruptura, módulo de elasticidade e a ligação interna (GILLAH; IRLE; AMARTEY, 2000).

Devido à estabilidade dimensional aceitável, boa trabalhabilidade, superfície lisa e boa resistência na retenção de parafusos, os painéis MDF tornaram-se amplamente aceitos pelos mercados de móveis e decoração de interiores (HUA et al., 2012). O potencial de uso desses painéis também tem sido explorado pelo mercado de molduras, acabamentos de exteriores, pallets e decks, no qual está em rápida expansão (YE et al., 2007). Com essas características o MDF é um material que vem consolidando-se no mercado moveleiro nacional e internacional. O painel vem sendo usado frequentemente em substituição à madeira maciça, aos compensados e aglomerados (FOREST PRODUCTS LABORATORY, 2010).

Os painéis MDF são frequentemente empregados na composição de móveis em geral, especialmente, nas partes que necessitam de usinagem. Alguns exemplos do seu emprego são os seguintes: fabricação de pés e tampos de mesas, componentes frontais, internos e laterais de armários, fundos de gaveta, racks, estantes, guarda-roupas. Adicionalmente, podem ser empregados na construção civil em pisos finos, rodapés, almofadas de portas, divisórias, portas usinadas, batentes de portas, balaústres e peças torneadas (VALENÇA; ROQUE; SOUZA, 2000; IWAKIRI et al., 2005).

Os principais insumos utilizados na fabricação de painéis de madeira reconstituída são madeira e resina. Como no processo de fabricação do MDF são utilizadas fibras de madeira, e não partículas (caso do MDP – *Medium Density Particleboard*), mais madeira e resina são consumidos. Em média, no Brasil, consome-se 30% a mais de madeira para produzir 01 m³ de MDF, em relação ao que se consome de madeira para fabricação de 01m³ de MDP. Historicamente, esse fato tem implicado em custo de produção do MDF cerca de 30% superior ao custo de produção do MDP (BIAZUS; HORA; LEITE, 2010).

3.3.2 Fatores que influenciam as propriedades dos painéis MDF

As propriedades finais dos painéis de fibras são afetadas por uma série de fatores. Os principais fatores são: espécie de madeira, tipo de matéria-prima, teor e distribuição de umidade no colchão, densidade do painel, tipo de resina e aditivos especiais. Esses fatores interagem entre si, sendo que a mudança em um deles pode ocasionar a desestabilização de outros dependentes (MALONEY, 1977; AKBUKUT; KOÇ, 2004).

3.3.2.1 Espécie

A espécie de madeira é uma das variáveis mais importantes no processo de produção de painéis reconstituídos e interage com todas as demais. Por exemplo, a formulação da resina à base de ureia-formaldeído e a densidade final dos painéis são influenciadas pela espécie de madeira utilizada como matéria-prima (MALONEY, 1977).

As indústrias, geralmente, preferem espécies de coníferas como matéria-prima, em função de suas fibras mais longas favorecerem a resistência mecânica dos painéis, devido ao melhor entrelaçamento entre elas. Entretanto, a mistura desse tipo de madeira com a de espécies de folhosas vem sendo cada vez mais utilizada em função de sua maior disponibilidade (BENADUCE, 1998). De acordo com Cyr et al. (2006), o comprimento das fibras e a distribuição de resina sobre elas, afetam as propriedades do painel MDF produzido em escala industrial.

Alpar et al. (2010), estudando o potencial de novas espécies de matéria-prima para a produção industrial de MDF, verificaram que a mistura da madeira de clones de *Populus* spp., *Robinia pseudoacacia* e *Pinus nigra* resultaram em painéis cujas propriedades físicas e mecânicas mostraram-se satisfatórias, com exceção da ligação interna.

Akgül e Çamlıbel (2008), concluíram que é tecnicamente viável a manufatura de painéis MDF com madeira de *Rhododendron ponticum* L, podendo, também, ser a mesma utilizada em misturas com fibras de *Pinus sylvestris* L. e *Quercus robur* L.

Kartal e Green III (2003), verificaram que painéis MDF produzidos com misturas de madeira *Pinus nigra* Arnold var. *pallasiana* (20%), *Fagus orientalis* Lipsky (40%) e *Quercus robur* (40%) e de *Quercus robur* (100%), mostraram maior resistência ao ataque de fungos, quando comparados aos painéis MDF produzido com 100% de *Pinus nigra* Arnold var. *pallasiana* e com 100% de *Fagus orientalis* Lipsky.

Benaduce (1998) verificou ser possível a manufatura de painéis MDF com mistura de fibras de *Eucalyptus grandis* e *Pinus caribae* var *hondurensis*, uma vez que tais painéis revelaram qualidades aceitáveis. Entretanto, a autora constatou que as madeiras das referidas espécies apresentam comportamento diferente durante as operações de desfibramento e refino dos seus cavacos, sob as mesmas condições de processo, sendo aconselhável que as fibras sejam produzidas em linhas independentes.

A demanda por recursos lignocelulósicos não lenhosos também tem aumentado, devido à escassez de madeira, principalmente, utilizada para obtenção de produtos tais como serrados, polpa e papel. A disponibilidade de matérias-primas alternativas e baratas, baseadas em materiais lignocelulósicos, torna-se necessária para se aumentar a produção de painéis MDF em várias regiões do mundo (HALVARSSON; EDLUND; NORGREN, 2008).

Eroglu, Istek e Usta (2001), estudando a palha de trigo como matéria-prima, concluíram que as suas fibras podem ser utilizadas na produção de MDF, exclusivamente ou em mistura com madeira, gerando painéis com propriedades mecânicas convenientes, ressaltando que a redução da absorção de água pelos painéis pode ser minimizada adicionando-se de 1% a 2% de parafina.

Akgül e Tozluoglu (2007), estudando a possibilidade do uso de casca de amendoim (*Arachis hypogaea* L) na manufatura de MDF, indicaram que esses painéis podem ser produzidos utilizando-se até 30% de casca de amendoim, sem afetar de forma significativa as suas propriedades físicas e mecânicas, com exceção da ligação interna que se mostrou prejudicada. O acréscimo da casca de amendoim, acima de 30%, resultou no decréscimo dos valores dos módulos de elasticidade e de ruptura.

Çopur et al. (2008), investigando a possibilidade do uso da casca de avelã (*Coryllus arellana*) na produção de MDF, concluíram que esses painéis podem ser produzidos utilizando a referida matéria-prima na proporção de até 20%, sem interferir significativamente nas propriedades requeridas pelas normas que utilizaram.

Hirizoglu et al. (2010), verificaram que painéis MDF produzidos a partir de bambu (*Dendrocalamus asper*) e casca de arroz apresentaram propriedades físicas e mecânicas aceitáveis, podendo vir a tornarem-se matérias-primas alternativas para converter materiais de baixo valor econômico em painéis MDF.

Marinho et al. (2013), concluíram que as fibras de bambu gigante (*Dendrocalamus giganteus*) apresentam potencial para a manufatura de painéis MDF.

Belini (2012), concluiu que a utilização do colmo de cana-de-açúcar (*Saccharum sp.*), na forma de bagaço, em mistura com fibras de eucalipto, é viável para a manufatura de painéis em conjunto com matriz fibrosa predominante de eucalipto.

3.3.2.2 Densidade da madeira

A densidade da madeira é o parâmetro mais crítico para a determinação do potencial de uma dada espécie para a manufatura de painéis de madeira (KELLY, 1977; MALONEY, 1977).

De acordo com Kollmann, Kuenzi e Stamm (1975), algumas das propriedades dos painéis são afetadas pelo comprimento e espessura da parede celular das fibras que as compõem. A rigidez da fibra é baseada na espessura da sua parede celular e no diâmetro do lume, bem como na forma da seção transversal. Fibras de espécies de folhosas são mais difíceis para formar painéis de fibras do que os traqueídes de espécies de coníferas.

Devido à sua variabilidade, a densidade torna-se um reflexo das inúmeras influências externas e internas que atuam na organização e dimensões das células do lenho, jamais fornecendo valores fixos e exatos (LATORRACA; ALBUQUERQUE, 2000). De acordo com Vidaurre et al. (2011), a espessura da parede celular do lenho juvenil é menor do que a do lenho adulto, com isso, a densidade da madeira tende a aumentar com o aumento da idade da árvore. Barrichelo (1979) verificou que a densidade do lenho tardio pode ser de 30 a 100% maior que a densidade do lenho inicial.

Para Florsheim e Tomazello Filho (1998), entre os parâmetros utilizados na análise da qualidade da madeira, a densidade básica tem merecido destaque por ser um bom indicador de determinadas características dessa matéria-prima.

Geralmente, painéis manufaturados com madeiras de baixa densidade possuem propriedades mecânicas superiores aos manufaturados com madeira de maior densidade, pois possuem menor resistência à compressão, e contribuem para assegurar uma área de contato suficiente entre as fibras no momento da prensagem do colchão, entretanto, suas propriedades físicas podem ser afetadas (MALONEY, 1977).

Myers e Crist (1986), utilizando na manufatura de painéis de fibras, como matérias-primas as madeiras jovens de um híbrido *Populus tristis* x *P. balsamiferu*, com 6 anos de idade, e uma madeira adulta de *Populus tremuloides*, proveniente de floresta nativa, não encontraram diferenças significativas nas propriedades mecânicas e na estabilidade dimensional dos painéis MDF manufaturados a partir de ambos os tipos de matérias-primas.

Além disso, não observaram diferença entre o consumo de energia na etapa de desfibramento e refinação dos cavacos das mesmas.

Pugel, Price e Hse (1990a), estudando as propriedades mecânicas de MDF produzidos com madeira juvenil e adulta de *Pinus taeda*, verificaram que o módulo de ruptura, módulo de elasticidade e a ligação interna dos painéis dos dois tipos de madeira equivaleram-se.

Pugel, Price e Hse (1990b), estudando a estabilidade dimensional de MDF produzidos a partir de madeira juvenil e adulta de *Pinus taeda*, concluíram que apesar dos painéis produzidos com madeira juvenil terem apresentado menor estabilidade dimensional, restringindo sua aplicação em alguns casos, revelaram ser capazes de competir com os painéis produzidos com madeira adulta.

De acordo com Pugel et al. (2004), painéis à base de madeira produzidos a partir de madeira juvenil podem apresentar propriedades aceitáveis. A implicação para a indústria é que, embora existam algumas desvantagens para a produção de painéis com uma elevada percentagem de madeira juvenil, as propriedades são suficientes, na maioria dos casos, para satisfazer os requisitos de qualidade. Uma abrangente análise econômica seria necessária para avaliar completamente as implicações do uso da madeira de culturas de rápido crescimento para produção de painéis à base de madeira.

Shupe et al. (1999), verificaram que painéis MDF produzidos com madeira juvenil e com madeira adulta de *Pinus taeda* podem apresentar propriedades físicas e mecânicas equivalentes.

De acordo com Maloney (1977), a variação de densidade das madeiras que compõem o painel, pode interferir no processo de manufatura do mesmo. Hua et al. (2010), estudando o efeito da adição de cavacos de madeira de *Populus lasiocarpa* em um processo de desfibramento de cavacos de madeira de *Larix sp* Mill. e de *Pinus massoniana* Lamb., verificaram um aumento na qualidade final das fibras obtidas e uma redução do consumo de energia no processo. Os autores atribuíram esses resultados à baixa densidade da madeira de *Populus lasiocarpa* em relação às demais.

De acordo com Akbulut e Ayırmis (2006), as propriedades físicas e mecânicas de painéis de fibras produzidos com lenho de reação são inferiores às dos painéis produzidos com lenho normal. No processo de desfibramento da madeira de compressão são gerados não somente fibras, mas, feixes de fibras também, e isso pode ser resultado das características químicas, físicas ou anatômicas deste tipo de madeira anormal.

Benaduce (1998) analisou as características dos cavacos produzidos a partir das madeiras de *Pinus caribae* var. *hondurensis* e *Eucalyptus grandis*, obtidos sob as mesmas condições de processamento, e constatou que houve diferença na granulometria dos cavacos gerados, tendo isso ocorrido devido a divergência entre as densidades das madeiras de ambas as espécies. Em função desses resultados, a autora previu que se os cavacos destas espécies viessem a ser submetidos ao mesmo nível de energia numa operação de desfibramento e refino, resultaria desse processo além de fibras, frações maiores como feixes de fibras e até mesmo cavacos não fragmentados totalmente.

3.3.2.3 Teor de extrativos e pH da madeira

A acidez da madeira (pH e capacidade tampão) é outro fator importante na escolha da espécie. Na manufatura de painéis, há algumas condições químicas que devem ser adequadas para proporcionar a cura da resina em condição desejável. Neste sentido, a acidez do colchão de partículas ou de fibras exerce uma forte influencia sobre a cura da resina (MALONEY, 1977). O tempo e temperatura de prensagem dos painéis devem ser ajustados ao pH do meio para obter ótimos valores de adesão interna. É muito importante reduzir os valores de pH através da operação de desfibramento e refino dos cavacos, pois, a resina ureia-formaldeído utilizada na produção dos painéis de fibra cura em meio ácido (XING et al.; 2006c).

Madeiras com pH entre 4,0 e 4,5 não requerem adição de catalisador ácido à resina, pois essas condições promovem uma cura adequada da resina à base de ureia-formaldeído. No entanto, pode-se adicionar uma pequena quantidade de catalisador para acelerar a cura. Recomenda-se adicionar catalisador ácido em processos que envolvam espécies de alto pH e uso de ureia-formaldeído, para que a cura da resina ocorra na etapa de prensagem a quente (MALONEY, 1977).

Madeiras com pH muito ácido podem ocasionar a pré-cura da resina ureia-formaldeído durante a fase de fechamento da prensa, e isso fará com que ocorra a redução da adesão entre as fibras e consequentemente os valores das propriedades mecânicas dos painéis (KELLY, 1977).

Marra (1992, citado por Iwakiri et al., 2012a), afirma que madeiras com altas quantidades de extrativos tendem a apresentar dificuldades na colagem, o que resulta numa baixa resistência da ligação adesiva que se forma entre as partículas.

Problemas na prensagem a quente de painéis de madeira, cujo teor de extrativos é alto, podem ocorrer, prejudicando a reação de cura do adesivo e, por consequência, a qualidade da colagem. Além disso, extrativos voláteis podem se desprender em forma de vapor na etapa de prensagem, e causarem explosões e a delaminação do painel no final da prensagem, no momento da abertura da prensa, quando a pressão de prensagem é aliviada (MALONEY, 1977).

3.3.2.4 Teor de casca

De acordo com Kollmann, Kuenzi e Stamm (1975), a casca da madeira não interfere de maneira significativa na manufatura de painéis MDF, desde que seja admitida no processo a um teor máximo de 10%. O aumento do teor de casca admitida no processo poderá resultar nas seguintes consequências: aumento dos teores de extrativos e de impurezas, dificuldade na operação de desfibramento dos cavacos e o controle do pH, aumento no consumo de adesivo, interferência na reação de cura do adesivo, redução do grau de coesão entre as fibras, interferência no ciclo de prensagem do colchão de fibras e alteração da densidade nominal do painel, prejudicar a aparência e a qualidade superficial do painel, bem como suas propriedades físicas e mecânicas.

Woodson (1976), manufaturando painéis MDF com 100 % *Liquidambar styraciflua* L., 100% de madeira de *Quercus falcata* var. *falcata* e 100% de madeira de *Carya tomentosa* Nutt, com adição 13,4%, 20,0% e 18,6% de casca de suas madeiras, respectivamente, concluiu que painéis MDF de boa qualidade tecnológica podem ser manufaturados com a partir de cascas de espécies folhosas, desde que ocorra uma distribuição de adesivo adequadas. Entretanto, segundo o autor, os valores das propriedades mecânicas desses painéis são reduzidos com o acréscimo de casca, podendo esse comportamento ser minimizado alterando o ciclo de prensagem. Segundo Gao et al. (2011) essa redução ocorre devido as fibras de madeira serem geralmente mais resistentes devido ao seu alto teor de celulose e baixos teores de açúcar livre, ácidos orgânicos e compostos solúveis em água presentes em sua composição, quando comparadas com as fibras da casca de madeira.

Nemli e Çolakoglu (2005) atribuíram a redução de emissão de formaldeído e ao inchamento em espessura dos painéis as altas quantidades de extrativos (polifenólicos e taninos) presentes na casca da madeira. De acordo com os autores, esses componentes podem reagir com o formaldeído da resina aumentando o potencial de colagem.

Xing et al. (2006a) produziram painéis MDF com diferentes espécies de madeira e porcentagens de casca, e concluíram que o acréscimo de teor de casca afetou negativamente todas as propriedades desses painéis, incluindo módulo de ruptura, módulo de elasticidade, ligação interna, inchamento em espessura e absorção de água. Entretanto, os valores de todas as propriedades mencionadas mostraram-se compatíveis aos prescritos pela norma ANSI A208.2-2002, exceto o inchamento em espessura.

Gao et al. (2011) produziram painéis MDF com 100% de casca de *Picea mariana*, e verificaram que as propriedades mecânicas desses painéis revelaram-se satisfatórias. Com base nisso, inferiram que é tecnicamente viável a utilização da casca na manufatura dos painéis.

3.3.2.5 Processo de desfibramento dos cavacos

Os processos utilizados no desfibramento da madeira são os seguintes: mecânico, termomecânico, químico-mecânico e de explosão (IWAKIRI et al., 2005). O processo termomecânico é o mais frequentemente utilizado no desfibramento de cavacos nas indústrias de MDF. A pressão, temperatura e o tempo de pré-aquecimento dos cavacos são parâmetros importantes para desfibrá-los através desse processo (AISYAH et al., 2012).

O processo termomecânico envolve a etapa de pré-aquecimento dos cavacos e a etapa de desfibramento. A primeira etapa visa, por intermédio de condições controladas de pressão, temperatura e de tempo de permanência no pré-aquecedor, atingir o estado plástico da lignina, reduzir o consumo de energia mecânica gasta na etapa posterior (desfibramento e refino) e melhorar a qualidade das fibras produzidas. Em termos de temperatura, pressão e tempo, existem dois métodos que podem ser aplicados no pré-aquecimento dos cavacos. No primeiro método, os cavacos são aquecidos à temperatura de 150 a 180 °C e pressão de 5 kgf/cm², por um período de 30 minutos, para depois serem desfibrados no moinho de disco. No segundo método os cavacos são aquecidos à temperatura de 170 a 180 °C e pressão de 7 a 11,5 kgf/cm², por um período de 20 a 60 segundos, para depois serem desfibrados no moinho de disco (IWAKIRI et al., 2005).

A eficiência no processo de desfibramento dos cavacos pode ser aumentada com a adição de tratamento químico no processo, enfraquecendo a lignina entre as fibras, aumentando a qualidade das fibras e diminuindo o consumo de energia. Por outro lado, a adoção deste tipo de tratamento pode modificar a composição química das fibras (FOREST PRODUCTS LABORATORY, 2010).

A refinação de fibras pelo processo termomecânico é uma das etapas críticas para a manufatura dos painéis MDF. Para aumentar a produtividade e melhorar a qualidade da fibra, com redução no consumo de energia durante o refino, é essencial adotar condições adequadas, por exemplo, o tempo de retenção dos cavacos no pré- aquecedor (HUA et al., 2012).

Belini et al. (2008a), estudando as alterações nos componentes anatômicos de cavacos de madeira de *Eucalyptus grandis* submetidos a diferentes condições de desfibramento, verificou que o aumento na intensidade de refino reduziu o comprimento médio das fibras, o número de vasos e de parênquima, elevou o percentual de fibras quebradas no sentido transversal e escureceu os componentes celulares.

Xing et al. (2008), estudando o efeito da pressão em refinação termomecânica sobre as propriedades das fibras de madeira obtidas, verificaram que pressões mais elevadas causaram danos mais severos em camadas perto do lume do que nas superfícies das fibras. A forma natural e as dimensões transversais das paredes das células não foi modificada em pressões inferiores a 4 bar, entretanto, com o aumento da pressão para níveis mais elevados (14 e 18 bar), as fibras tenderam a colapsar.

Snell, Groom e Rials (2001) observaram que fibras de *Pinus taeda* sujeitas a até 2 bar de pressão tiveram suas propriedades mecânicas preservadas, acima deste valor, e especialmente na faixa entre 4 e 8 bar, as fibras apresentaram aumento de rugosidade em suas superfícies.

De acordo com Li e Pang (2006) o pré-aquecimento e a refinação da madeira, juntamente com a secagem das fibras, são as etapas no processo produtivo que mais consomem energia térmica e elétrica. De acordo com Hua et al. (2012), além da questão do consumo de energia, os parâmetros utilizados na refinação da madeira através do processo termomecânico afetam, também, a qualidade final das chapas, fazendo com que as indústrias de MDF foquem na eficiência do refinador. Os mesmos autores concluíram que a redução do tempo de retenção dos cavacos no pré-aquecimento resultou em maior proporção de feixes de fibras, reduzindo o percentual total de fibras de boa qualidade produzidas.

Os parâmetros de refino, em especial o tempo e as pressões empregadas no pré-aquecimento dos cavacos e na caixa de discos, afetam a qualidade das fibras produzidas e, por consequência, as propriedades finais dos painéis MDF. Para evitar que sejam produzidas grandes quantidades de feixes de fibras, os níveis daqueles parâmetros de refino devem ser aumentados, propiciando, também, uma melhor distribuição em termos de comprimentos de fibras obtidas. Contudo, o aumento da pressão para níveis muito elevados pode reduzir o

comprimento das fibras, bem como diminuir as suas resistências (XING, 2006b; XING et al., 2008).

Xing, Deng e Zhang (2007), concluíram que a pressão do vapor aplicada no pré-aquecimento dos cavacos e na caixa de desfibramento afetou a qualidade das fibras obtidas e, por consequência, afetou significativamente as propriedades finais dos painéis MDF, tais como o módulo de ruptura, módulo de elasticidade e a ligação interna. O tempo de retenção dos cavacos no pré-aquecimento, também, afetou de maneira significativa o módulo de ruptura e o módulo de elasticidade. Entretanto, nenhum dos parâmetros (pressão e tempo) teve efeito significativo sobre a estabilidade dimensional dos painéis MDF.

Aisyah et al. (2012), estudando as propriedades de painéis MDF de *Hibiscus cannabinus*, em função das condições de refinação das fibras, verificaram que a condição de refino leve (3 bar e 3 min de refinação) produziu maior proporção de mistura de fibras longas, as quais, incorporadas na manufatura dos painéis, proporcionaram-lhes elevados valores nas propriedades de flexão estática, baixa resistência da ligação interna e redução nos valores das propriedades físicas. Fibras refinadas sob 7 bar de pressão de refino com o tempo de cinco minutos, proporcionaram melhores propriedades mecânicas e dimensionais aos painéis, com absorção de água de 14,6%, inchamento em espessura de 63,2%, módulo de ruptura de 30,33 MPa, módulo de elasticidade de 3619 MPa e ligação interna de 0,66MPa.

3.3.2.6 Adesivo

A resistência dos painéis MDF é influenciada pela interação entre as fibras e o adesivo. Assim, a presença de uma quantidade de adesivo adequada é necessária para garantir uma boa colagem entre as fibras. Para a fabricação de MDF, a lignina existente na madeira não é suficiente para agregar as fibras, passando a ser necessário adicionar algum tipo de elemento ligante. Os três principais tipos de resinas utilizadas para a manufatura do MDF são: ureia-formaldeído, fenol-formaldeído e melamina-formaldeído (MALONEY, 1977; HALVARSSON et al., 2008).

A adesão pode ser entendida como um fenômeno que provê um mecanismo de transferência de tensões entre a madeira e a resina, através de processos moleculares. A ligação se torna eficiente quando há um grande contato entre o adesivo e as fibras, promovido pela pressão e temperatura aplicadas na etapa de prensagem. Além dos parâmetros relacionados às características físico-químicas do adesivo, as características do substrato, procedimentos de colagem, as condições da matéria-prima a ser utilizada e a quantidade de

resina também podem influenciar na velocidade de cura da resina e na aplicabilidade final do produto (CAMPOS; LAHR, 2004).

A resina ureia-formaldeído é o adesivo mais utilizado na fabricação de painéis de MDF. Isso se deve ao seu baixo custo, disponibilidade em solução aquosa, a uma velocidade de cura consideravelmente alta, também, porque não interfere significativamente na cor final do produto (LESSMANN, 2008).

A desvantagem do uso de adesivo à base de ureia-formaldeído, além da taxa de emissão de formaldeído, é a sua baixa resistência em condições ambientais de alta umidade, as quais degradam a resistência da colagem, limitando o MDF apenas para uso interno (MALONEY, 1977; PARK et al., 2001). Em contrapartida, o adesivo a base de fenol-formaldeído pode ser aplicado no MDF de uso externo, apresentando alta durabilidade, porém, alto custo (PARK et al., 2001).

De acordo com Eleotério (2000), o teor de resina expresso em kg/m^3 apresenta maior correlação com as variáveis: módulo de elasticidade, módulo de ruptura, ligação interna, inchamento e absorção de água do que o mesmo fator expresso em percentagem. Isso demonstra que um mesmo teor de resina, em percentagem, para painéis de diferentes densidades tem efeitos diversos e que o recobrimento das fibras não é constante, para este mesmo teor.

Benaduce (1998) verificou que a ligação interna e as propriedades de flexão estática de painéis MDF aumentaram com o acréscimo do teor de resina ureia-formaldeído.

Halvarsson (2010) constatou que as propriedades físicas e mecânicas de painéis MDF manufaturados a partir de palha de trigo e arroz estiveram estritamente ligadas ao teor de resina aplicado na colagem.

Eleotério (2000), manufaturando painéis MDF de diferentes densidades e teores de resina, concluiu que não houve interação significativa dessas variáveis sobre os resultados das propriedades de flexão estática (MOR e MOE), porém, observou o contrário sobre os resultados de ligação interna, absorção de água e inchamento em espessura dos painéis.

De acordo com Campos e Lahr (2004), a cura dos adesivos à base de melamina-formaldeído, ao contrário das resinas ureia-formaldeído, pode ser atingida sem catalisadores ácidos, mas, simplesmente através do calor, destacando-se como outra vantagem o fato de que possui maior resistência à água. As desvantagens são o seu alto custo de produção e a pequena vida útil em solução aquosa.

Campos e Lahr (2004), avaliando as propriedades físicas e mecânicas de painéis MDF manufaturados com diferentes teores de resina poliuretana à base de mamona

verificaram que o acréscimo desta variável proporcionou aumento nos valores de módulo de resistência à flexão estática e de resistência à tração perpendicular dos painéis.

Lee et al. (2012), observaram que painéis MDF, produzidos com resina melamina-uréia-formaldeído (MUF), apresentaram leve melhora na resistência ao ataque de fungos e cupins, quando comparados aos painéis MDF fabricados apenas com resina ureia-formaldeído.

3.3.2.7 Catalisador

A cura das resinas à base de ureia-formaldeído ocorre pela ação do calor da prensa e de um catalisador, utilizado no processo de produção de painéis MDF. Os catalisadores empregados para tal finalidade, em geral, são substâncias que liberam ácidos como, por exemplo, os sais de amônio (BELINI, 2007). O sulfato de amônia é o catalisador mais empregado na cura da resina ureia-formaldeído em processos de prensagem a quente de painéis, normalmente, em temperaturas de prensagem entre 60 °C e 120 °C (IWAKIRI et al., 2005).

3.3.2.8 Emulsão de parafina

Muitos aditivos podem ser adicionados na composição de painéis de partículas de madeira e MDF. O mais comum é a parafina, na forma de emulsão, com teor de sólidos entre 0,5 e 1%, baseado sobre a massa de partículas ou fibras secas (MALONEY, 1977). A adição da emulsão de parafina tem o objetivo de proporcionar ao painel a propriedade de hidrorepelência (BELINE, 2007). Contudo, a adição de emulsão de parafina com teor de sólido elevado (acima do sugerido por Maloney, 1977) pode resultar em redução dos valores das propriedades de resistência mecânica do painel (KELLY, 1977). De acordo com Moslemi (1974a), a parafina o efeito de repelência de água líquida nos painéis é eficiente somente em curto intervalo de tempo.

3.3.2.9 Teor de umidade do colchão

O teor de umidade do colchão de partículas e fibras de madeira é um fator crítico na manufatura dos painéis, pois, além de influenciar no tempo total da prensagem, também, interfere no perfil de densidade do painel resultante. A velocidade de transferência de calor da superfície da chapa para o seu miolo é mais efetiva na cura do adesivo por convecção do vapor d'água do que por condução através da madeira e irradiação através do ar (KELLY, 1977).

A umidade presente no colchão de fibras tem importantes funções, dentre elas, transferir calor para o centro do painel durante a prensagem e diminuir a resistência do material à compressão, reduzindo a pressão específica necessária a ser aplicada. Colchões de fibras com baixos teores de umidade, quando prensados, podem não atingir a espessura final desejada para o painel, entretanto, tais condições resultam em painéis cujos miolos tornam-se relativamente mais densos e, assim, os valores de resistência à tração perpendicular e de resistência ao arranque de parafusos aumentam (MALONEY, 1977).

Alto teor de umidade nas faces do colchão de partículas ou fibras e baixo teor de umidade no centro resultarão em painéis com altas densidades nas faces em relação ao miolo e, assim, os valores das propriedades de resistência e rigidez à flexão estática serão significativamente maiores do que os de painéis formados por colchões com teor de umidade uniforme. (MALONEY, 1977).

De acordo com Belini (2012), colchões de fibras com baixo teor de umidade, quando prensados a quente para consolidar o painel MDF, tornam insuficiente a transferência de calor da superfície para o centro do colchão, afetando a cura da resina e podendo causar baixa densificação do painel resultante, por outro lado, altos teores de umidade nos colchões formam bolhas de vapor na superfície do painel, causadas pela elevada pressão de vapor que se forma no centro. O mesmo autor sugere que para esse último problema ser evitado é necessário reduzir a pressão no início da prensagem.

Por outro lado, altos teores de umidade nos colchões de fibras ou partículas exigem que o ciclo de prensagem a quente seja excessivamente longo, para que ocorra a eliminação da umidade através das suas bordas, evitando a delaminação do painel após a liberação da pressão no final da prensagem. O excesso de umidade, também, interfere na reação química de cura das resinas (KELLY, 1977).

A velocidade de penetração de calor no colchão exerce influência sobre o tempo de prensagem e o perfil de densidade do painel resultante, os quais, por sua vez, respectivamente,

alteram os níveis de produtividade do processo de produção e as propriedades finais do painel, tais como o módulo de elasticidade, o módulo de ruptura e a ligação interna (CAI; MUEHL; WINANDY, 2006a).

Para HEEBINK (1972) e STRICKLER (1959), ambos citados por IWAKIRI (1989), o tempo requerido para aquecimento do miolo decresce com o aumento da umidade da superfície do colchão. Para os mesmos autores, os valores ótimos para o teor de umidade do colchão estão entre 11 e 14%.

Cai, Muehl e Winandy (2006a) estudando o efeito do teor de umidade do colchão de fibras sobre as propriedades físicas e mecânicas dos painéis MDF resultantes, concluíram que o teor de umidade do colchão afetou a cura da resina e conseqüentemente, a ligação interna do painel, entretanto não foi observado efeito significativo no módulo de elasticidade e de ruptura.

3.3.2.10 Ciclo de prensagem

A prensagem é uma das fases mais importantes na manufatura de painéis de madeira, porque é nesta fase que as suas espessura e densidade final são determinadas (ELEOTÉRIO, 2000).

A consolidação do colchão de fibras de madeira para a formação do painel é obtida por um processo de prensagem a quente. Este processo é bastante complexo, uma vez que implica simultaneamente em transferência de calor e massa, e na polimerização do adesivo. A melhoria da eficiência da prensagem e do seu controle pode ser conseguida por meio de simulação de modelos através da realização de um programa experimental em escala piloto, a fim de aperfeiçoar seus parâmetros, como a pressão e a temperatura de prensagem. Isso irá permitir a programação do ciclo de prensagem para cumprir o objetivo de minimizar o consumo de energia, melhorar a qualidade dos painéis e aumentar a flexibilidade no processo de produção (CARVALHO; COSTA; COSTA, 2003).

As principais funções da temperatura na prensagem para manufatura de painéis de fibras ou partículas são: plasticizar a madeira e reduzir sua resistência à compressão, consolidar o colchão para a espessura e densidade final desejada e polimerizar a resina entre as partículas adjacentes (KELLY, 1977).

Durante a prensagem a quente, por condução, os pratos quentes transferem calor para as camadas exteriores do colchão de fibras e, em seguida, em direção ao núcleo. O calor aumenta a temperatura do colchão de fibra, ocasionando a plasticização da fibra de madeira e

a cura da resina. A velocidade de penetração de calor para o interior do colchão determina o tempo de prensagem, que é crítico para o desenvolvimento da produtividade e das propriedades do painel, tais como o módulo de elasticidade, o módulo de ruptura e a ligação interna (CAI; MUEHL; WINANDY, 2006b).

O tempo de fechamento da prensa é um parâmetro importante na prensagem e corresponde ao intervalo de tempo entre o contato inicial do prato da prensa com a superfície do colchão e o momento em que a espessura final do painel é atingida, exercendo grande influência sobre a formação do seu perfil de densidade (MALONEY, 1977). O tempo de prensagem é o intervalo de tempo compreendido entre o momento em que o colchão atingiu a espessura final do painel, até a abertura dos pratos da prensa. Essa variável determina a produtividade da empresa (IWAKIRI, 1989).

Winandy e Krzysik (2007), estudando o efeito do calor sobre as fibras de madeira durante a prensagem a quente de painéis MDF, observaram que certa degradação térmica ocorreu modificando as características de sorção de umidade, as propriedades físicas e mecânicas, e a durabilidade dos painéis.

HEEBINK (1972), citado por IWAKIRI (1989), afirma que altas temperaturas de prensagem dos colchões de fibras ou partículas de madeira permitem fluxos mais rápidos de calor, permitindo aumentar a densificação interna do painel, resultando em maior resistência das ligações internas e menor resistência a flexão estática.

Eroglu, Istek e Usta (2001), estudando o efeito da temperatura de prensagem sobre as propriedades físicas e mecânicas de painéis MDF, verificaram que com 6 minutos de prensagem os painéis apresentaram maiores valores de módulo de elasticidade, módulo de ruptura e ligação interna e menores valores para absorção de água e inchamento em espessura quando comparados a 5 e 7 minutos de prensagem.

3.3.2.11 Teor de umidade do painel

O painel MDF é um material higroscópico e o seu teor de umidade de equilíbrio é influenciado pela umidade relativa e a temperatura do ar do ambiente em que se encontra. Sabe-se que variações no teor de umidade dos painéis podem afetar-lhes a estabilidade dimensional (AYRILMIS, 2007) e a resistência mecânica. O aumento do teor de umidade do painel causa redução no valor das suas propriedades mecânicas (NIEMZ; DIENER; POHLER, 1997).

A umidade do ambiente em que um determinado painel de madeira se encontra em uso é, sem dúvida, o fator mais importante que afeta o seu desempenho e vida útil. Em certas condições, mudanças de umidade relativa podem resultar em mudanças na estabilidade dimensional do painel. A integridade e a força da colagem entre fibras ou partículas de madeira podem ser comprometidas pelas tensões induzidas por inchamento ou retração do painel, respectivamente, causadas pela adsorção ou desorção de umidade. Consequentemente, as ligações adesivas (por exemplo, fibras-adesivo-fibras) do painel podem ser comprometidas em exposição a condições de elevada umidade ou pela sua constante variação (CARLL; WIEDENHOEFT, 2009).

3.3.2.12 Densidade do painel

A densidade do painel é um fator que apresenta forte influência sobre as suas demais propriedades. O aumento na densidade do painel, utilizando madeira de mesma densidade, é um dos métodos que pode ser utilizado para melhorar as suas propriedades de resistência mecânica. Esse aumento proporciona maior contato entre as fibras e menor perda de resina em espaços vazios, resultando em melhoria da eficiência da colagem e, por consequência disso, das propriedades mecânicas também (MALONEY, 1977). O aumento da densidade do painel, utilizando madeira de mesma densidade, promove por meio da compactação das fibras, o aumento da razão de compactação do painel. Moslemi (1974a) define a razão de compactação dos painéis, como sendo a relação entre a densidade do painel e a densidade da madeira. A razão de compactação afeta diretamente as propriedades físicas e mecânicas dos painéis.

De acordo com Kelly (1977), a densidade do painel afeta o seu inchamento em espessura. Segundo o autor, quando produzidos com o mesmo tipo de madeira, painéis de maior densidade apresentam maior quantidade de sítios higroscópicos e maior razão de compactação, comparados aos painéis de menor densidade. Os painéis de maior densidade ao entrarem em contato com a água liberam as tensões de compressão de maior magnitude, resultando em maior inchamento em espessura do painel.

Ayrilmis (2007) observou que o aumento da densidade do painel afetou negativamente a expansão linear e o inchamento em espessura dos painéis MDF.

Halvarsson, Edlund e Norgren (2008), estudando as propriedades de MDF produzidos a partir da palha de trigo, verificaram que o aumento da densidade média dos painéis na faixa entre 750 a 1000 kg/m³ apresentou relação positiva com as propriedades mecânicas e negativas com a absorção de água e o inchamento em espessura. A densificação

dos painéis MDF gerou um número maior de pontos de contato (interligação entre as fibras) os quais melhoraram a resistência à flexão e a ligação interna dos painéis MDF.

De acordo com Ayrilmis (2007), o aumento no inchamento em espessura ocorrido pela densificação do painel, pode ser atribuído, principalmente, à liberação das tensões de compressão geradas durante a prensagem do painel, bem como à deterioração da ligação entre fibras.

De acordo com Li e Pang (2006), a produção de painéis MDF com menor massa específica consome menos energia e matéria-prima, entretanto, requer a aplicação de maior teor de resina para os painéis alcançarem adequados valores de ligação interna.

Ganev et al. (2003), verificaram que o efeito da densidade do painel MDF sobre os coeficientes de expansão e contração lineares foi mais significativo do que sobre os coeficientes de inchamento e retração em espessura.

Cai, Muehl e Winandy (2006a), concluíram que a densidade do painel MDF apresentou relação positiva com o módulo de elasticidade, módulo de ruptura e ligação interna.

Akgül et al. (2007), produziram painéis MDF, com fibras de madeira de *Quercus robur* e densidade de 600, 700 e 800 kg/m³, e concluíram que o aumento da densidade afetou negativamente o inchamento em espessura, ou seja, resultou em aumento do valor dessa propriedade, e positivamente a absorção de água, ou seja, resultou em redução do valor desta propriedade. Adicionalmente, os valores das propriedades mecânicas, tais como da ligação interna, módulo de ruptura, módulo de elasticidade e dureza Janka, foram todos favorecidos. Os autores atribuíram esses resultados ao aumento da razão de compactação dos painéis, decorrente do aumento das suas densidades, quando se utiliza a mesma matéria-prima na produção.

4 MATERIAL E MÉTODOS

4.1 Matéria-prima

No presente estudo foram utilizadas madeiras da espécie *Schizolobium amazonicum* Huber ex Ducke, sob a forma de toras (TOR) e de resíduos de lâminas (LAM), e uma mistura de madeiras nativas da Amazônia (MIX).

O material denominado TOR é proveniente de plantios realizados pelo Grupo Concrem, na época da coleta com 08 anos de idade, situados nos municípios de Paragominas, Dom Eliseu e Ulionópolis - PA.

O material denominado LAM, teve origem de resíduos de lâminas das indústrias produtoras de painéis compensados do Grupo Concrem, localizadas em Paragominas e laminadoras de municípios vizinhos.

A madeira de MIX incorpora resíduos de serrarias e de laminadoras, localizadas em Paragominas e municípios vizinhos, tais como rolos-resto, refilos, destopos, aparas e costaneiras.

Por serem provenientes de diversas indústrias, a idade das madeiras de LAM e MIX não puderam ser determinadas, bem como também não puderam ser determinadas as espécies de madeira integrantes do MIX. Destaca-se que por ser composta por espécies provenientes de florestas nativas na Amazônia, é de se esperar que o MIX apresente madeira de árvores com idades avançadas.

Nas instalações industriais da Floraplaç MDF os materiais TOR, LAM e MIX foram transformados em cavacos que depois de desfibrados deram origem a fibras, as quais foram utilizadas na manufatura de diferentes tipos de painéis de fibras de média densidade (MDF). Amostras dos citados cavacos, de fibras e de painéis MDF foram coletadas na empresa e cedidas para o desenvolvimento do presente estudo.

4.1.1 Obtenção e coleta dos cavacos de madeira

A partir do pátio de matérias-primas, os materiais TOR, LAM e MIX foram levados, por meio de uma pá carregadeira, até uma esteira transportadora responsável por alimentar o picador. Neste equipamento, a matéria-prima foi fragmentada e transformada em cavacos (Figura 3).

Figura 3- Cavacos de madeira utilizados para a manufatura dos painéis MDF; (A) Cavacos de MIX; (B) Cavacos de TOR; (C) Cavacos de LAM

Seguida a fragmentação do material, os cavacos resultantes foram transportados, por esteiras, sendo uma parte destinada ao pátio de armazenagem de cavacos e outra parte destinada ao silo dosador.

No pátio de armazenagem, os cavacos estavam separados por tipo de matéria-prima (MIX, TOR e LAM), sendo possível coleta-los separadamente. No período de 08 dias, foi coletado aproximadamente 01 kg de cavacos/dia/matéria-prima, totalizando 08 amostras/matéria-prima e 24 amostras de cavacos no total.

Todo o material coletado foi devidamente armazenado em sacos plásticos, os quais, depois de identificados, foram enviados ao Laboratório de Laminação e Painéis de Madeira – LLAPAM do Departamento de Ciências Florestais - LCF da ESALQ/USP, para os estudos de caracterização.

4.1.2 Caracterização dos cavacos de madeira

4.1.2.1 Densidade básica

Para a determinação da densidade básica da madeira, de cada amostra de cavacos foi retirada 01 subamostra aleatoriamente, de aproximadamente 150 g de cavacos, totalizando 24 subamostras (TOR, LAM e MIX). Os cavacos foram contidos, separados por subamostras, em redes de fios de nylon, e imersos em água até alcançarem a saturação completa. Posteriormente, os cavacos saturados foram pesados em balança de precisão e em seguida levados para secagem em estufa laboratorial, onde permaneceram à temperatura de 103 ± 2 °C, até atingirem massa constante (0% de umidade), para, finalmente, serem pesados novamente. A densidade básica foi determinada pela eq. (1), segundo o método do Máximo Teor de Umidade (MTU), descrita por Smith (1954).

$$D_B = \frac{1}{\frac{M_{SAT}}{M_S} - 0,346} \quad (1)$$

D_B = Densidade básica (kg/m³);

M_{SAT} = Massa saturada dos cavacos (kg);

M_S = Massa seca dos cavacos (kg);

0,346 = Constante.

A densidade básica das misturas das madeiras de LAM, TOR e MIX, referentes às diferentes proporções de fibras (*vide* item 4.1.3) utilizadas na produção dos painéis MDF, foi determinada segundo os procedimentos descritos no trabalho de Surdi (2012), conforme a eq. (2):

$$DB_M = \frac{(P_{LAM} \times DB_{LAM}) + (P_{TOR} \times DB_{TOR}) + (P_{MIX} \times DB_{MIX})}{100} \quad (2)$$

onde:

DB_M = Densidade básica da mistura de matéria-prima (kg/m³);

P_{LAM} , P_{TOR} e P_{MIX} = proporções de LAM, TOR e MIX na mistura (%);

DB_{LAM} , DB_{TOR} e DB_{MIX} = densidade básica de LAM, TOR e MIX (kg/m^3), determinadas conforme a Equação 1.

A etapa de determinação da densidade básica dos cavacos foi desenvolvida no Laboratório de Química, Celulose e Energia – LQCE do LCF da ESALQ/USP.

4.1.2.2 Mensuração das dimensões das fibras inteiras dos cavacos

Para caracterização das fibras inteiras da madeira provenientes dos cavacos de TOR, LAM e MIX, as 08 amostras de cavacos de cada tipo foram misturadas e de cada uma delas retirados aleatoriamente 18 cavacos de madeira.

Para a dissociação das fibras, os cavacos de madeira foram macerados pelo método de Franklin (1945), cujas etapas são as seguintes: (i) retirada de pequenas porções de cada cavaco de madeira selecionado; (ii) transferência para tubos de ensaio com solução macerante (ácido acético glacial e água oxigenada 120, 1:1; (iii) transferência para estufa ($60\text{ }^{\circ}C$, por 48 horas); (iv) remoção da solução e lavagem do material dissociado dos cavacos com água e (v) montagem de lâminas de vidro semipermanentes, compostas pelas as fibras inteiras dissociadas dos cavacos, glicerina e coloridas com safranina.

Para a mensuração das fibras, as lâminas de vidro semipermanentes foram examinadas em microscópio de luz para coleta de imagens, por meio de uma câmera digital acoplada. As imagens coletadas foram analisadas no software de análise de imagens Image Pro Plus, sendo mensuradas 33 fibras para determinação do comprimento (ampliação de 25 vezes) e 25 fibras para as determinações da largura, diâmetro do lume e espessura da parede celular das fibras (ampliação de 400 vezes), conforme as normas da INTERNATIONAL ASSOCIATION OF WOOD ANATOMY – IAWA (1989). A espessura da parede celular da fibra foi obtida indiretamente, de acordo com a eq. (3):

$$E_P = \frac{L_F - D_L}{2} \quad (3)$$

Onde:

E_P = Espessura da parede celular da fibra (μm);

L_F = Largura da fibra (μm);

D_L = Diâmetro do lume da fibra (μm).

A etapa de mensuração das fibras inteiras dos cavacos foi desenvolvida no Laboratório de Anatomia, Identificação e Densitometria de Raios X em Madeiras – LAIM do LCF da ESALQ/USP.

4.1.3 Coleta e mensuração das dimensões das fibras após o desfibramento industrial

Para a mensuração das fibras após o processo de desfibramento industrial foram coletadas na empresa 05 amostras de cada uma das 04 proporções de fibras utilizadas na produção dos painéis MDF, a saber: A = 15% de TOR, 15% de LAM e 70% de MIX; B = 25% de TOR e 75% de MIX; C = 40% de LAM e 60% de MIX; D = 25% LAM e 75% de MIX.

As amostras continham aproximadamente 100 gramas de fibras cada, as quais foram coletadas em intervalo de 15 minutos, diretamente da esteira formadora do colchão de fibras. Portanto, as fibras coletadas já encontravam-se impregnadas com resina e parafina.

As etapas de dissociação e mensuração das fibras coletadas foram realizadas conforme os mesmos procedimentos descritos no item 4.1.2.2. Contudo, neste caso, foram montadas 05 lâminas de vidro semipermanentes para cada uma das 04 proporções de fibras. Em cada uma das lâminas foram mensuradas 50 fibras para determinação do comprimento, e 20 fibras para as determinações da largura da fibra e do diâmetro do lume. A espessura da parede celular das fibras foi obtida empregando-se a Equação 3, citada anteriormente. Destaca-se que a quantidade de fibras mensuradas foi baseada na metodologia descrita no trabalho de Eleotério (2000).

4.2 Manufatura dos painéis MDF

Foram manufaturados painéis MDF com espessuras de 12 mm, 15 mm e 18 mm, massas específicas de 700 kg/m³ e 800 kg/m³, e proporções de fibras A, B, C e D (conforme descritas em 4.1.3). As demais condições de manufatura dos painéis foram mantidas em todos os casos.

Todas as etapas de manufatura dos painéis foram acompanhadas e desenvolvidas na linha de produção industrial da Floraplaç MDF, as quais se encontram descritas a seguir.

4.2.1 Condições de desfibramento dos cavacos

Os cavacos do silo dosador, obtidos conforme citado no item 4.1.1, depois de misturados, de acordo com cada uma das 04 proporções citadas em 4.1.3, lavados e classificados por tamanho, foram submetidos ao pré-aquecimento com vapor, a uma temperatura de 90 °C durante 8 minutos. Posteriormente, os cavacos passaram para o digestor, onde foram submetidos à temperatura de 190 °C e pressão de 8,5 bar, por um período de 5 minutos. Em seguida, os cavacos foram desfibrados em uma caixa de disco duplo com 9,5 bar de pressão.

4.2.2 Aplicação de adesivo e parafina sobre as fibras

A aplicação do adesivo e da emulsão de parafina sobre as fibras ocorreu simultaneamente, logo após a saída do desfibrador.

O adesivo utilizado para a colagem das fibras de madeira dos painéis MDF foi a ureia-formaldeído (UF), com teor de sólidos de 66%, pH igual a 8,2, tempo de gel (100 °C) de 60 segundos, viscosidade (25 °C) de 350 cP e massa específica de 1,28 g/cm³. A dosagem de resina utilizada no processo foi de 13 % (massa de sólidos da resina sobre a massa de fibras seca).

A emulsão de parafina utilizada apresentou as seguintes características: teor de sólidos de 66%, pH de 10,5 à 25 °C e um tempo de escoamento de 22 segundos à 25 °C. A dosagem de parafina empregada na manufatura dos painéis MDF foi de 0,7% (massa de sólidos da parafina sobre a massa de fibras seca).

4.2.3 Secagem das fibras

Após receberem a aplicação do adesivo e da parafina, as fibras passaram pelo processo de secagem, por meio de um secador de tubo, conduzidas por uma corrente forçada de ar quente entre 140 °C e 150 °C. Ao final da secagem as fibras continham um teor de umidade médio de 10%.

4.2.4 Formação do colchão de fibras e prensagem

O colchão de fibras foi formado sobre uma esteira móvel e passou pela etapa de pré-prensagem, com o objetivo de retirar o excesso de ar no seu interior e reduzir a sua espessura, facilitando o carregamento da prensa hidráulica com 12 aberturas, dotada de controle automático de temperatura, pressão e tempo de prensagem. Destaca-se que o processo de produção de MDF neste tipo de prensa configura-se como descontínuo e resulta em 12 painéis ao final do ciclo de prensagem.

Os parâmetros do ciclo de prensagem utilizado foram os seguintes: temperatura de 194 °C, tempos e pressões ao longo da prensagem em 17 fases: (i) 19 s para pressão de 0 à 210 N/cm²; (ii) manutenção por 20 s; (iii) redução da pressão para 45 N/cm² em 5 s; (iv) manutenção por 80 s; (v) aumento da pressão à 170 N/cm² em 10 s; (vi) manutenção por 40 s; (vii) redução da pressão 80 N/cm² em 5 s; (viii) manutenção por 1 s; (ix) redução da pressão para 55 N/cm² em 1 s; (x) manutenção por 1 s; (xi) redução da pressão para 35 N/cm² em 1 s; (xii) manutenção por 1 s; (xiii) redução da pressão para 20 N/cm² em 1 s; (xiv) manutenção por 1 s; (xv) redução da pressão para 14 N/cm² em 1 s; (xvi) manutenção por 1 s; (xvii) redução da pressão para 0 N/cm² em 1 s (Figura 4). Seguida a prensagem, a face inferior e superior (as quais estavam em contato com o prato inferior e superior da prensa, respectivamente) dos painéis foram demarcadas com giz de cera.

Figura 4 - Ciclo de prensagem dos painéis MDF

4.2.5 Coleta dos painéis MDF

Depois da prensagem, os painéis MDF foram resfriados e em seguida esquadrejados nas dimensões padrões de 1850 x 2750 mm, conforme procedimento usual da indústria.

A cada prensagem de 12 painéis foi coletado, aleatoriamente, 01 painel, e com o auxílio de uma serra circular, foi retirada uma tira nas dimensões de 600 x 1850 mm. A tira de MDF foi levada à lixadeira com a finalidade de determinar a espessura final do painel MDF. Após ser lixada e ter a sua espessura definida, a tira foi levada novamente a serra circular para ser retirada uma amostra de 60 x 60 cm que foi destinada aos estudos previstos, representando uma repetição do tratamento. Para compor as demais repetições, foram retiradas amostras, seguindo o mesmo procedimento citado, ressaltando-se que cada chapa (1850 x 2750 mm) originou apenas uma repetição. Para cada um dos tratamentos (descritos no item 4.7, Tabela 1) coletou-se 03 amostras de 60 x 60 cm. Após a coleta, as amostras dos painéis MDF foram enviadas pela empresa ao Laboratório de Ensaios Mecânicos de Madeira e Derivados – LEMMAD do Departamento de Ciências Florestais - LCF da ESALQ/USP.

4.3 Climatização dos painéis MDF

Os painéis MDF foram colocados e mantidos na sala de climatização do LEMMAD, com temperatura e umidade relativa controlada (22 ± 2 °C e $65 \pm 5\%$), até atingirem a umidade de equilíbrio com o ambiente. Para verificar essa condição foram efetuadas pesagens periódicas (a cada dois dias) dos painéis até o momento em que estes apresentaram massa constante.

4.4 Obtenção dos corpos-de-prova e avaliação das propriedades tecnológicas

Após o período de climatização, os painéis MDF foram esquadrejados com o auxílio de uma serra circular, excluindo-se 2,5 cm de cada uma das suas extremidades, visando eliminar os efeitos de borda, adquirindo as dimensões finais de 55 x 55 cm.

Posteriormente, foram retirados os corpos-de-prova, conforme esquema apresentado na Figura 5, para determinação do teor de umidade, massa específica aparente, absorção de água e inchamento em espessura (após duas e vinte e quatro horas de imersão), ligação interna, flexão estática (MOR e MOE), arranque de parafuso no topo, arranque de parafuso na face e do perfil de densidade.

As dimensões dos corpos-de-prova e os procedimentos de ensaio empregados na determinação das propriedades físicas e mecânicas dos painéis MDF foram baseados na norma NBR 15316 (ABNT, 2009), parte 2 e 3 e a determinação do perfil de densidade dos painéis MDF foi baseada no trabalho de Surdi et al. (2014).

Figura 5 - Esquema da retirada dos corpos-de-prova retirados dos painéis MDF. Legenda: APF = Arranque de Parafuso na Face; APT = Arranque de Parafuso no Topo; LI = Ligação Interna; ABS/INC = Absorção de água e Inchamento em espessura; TU = Teor de umidade; ME = Massa Específica Aparente; PD = Perfil de densidade.

Os ensaios físicos foram realizados no LLAPAM, utilizando paquímetros, micrometros, estufa laboratorial e balança de precisão. Os ensaios mecânicos foram realizados no LEMMAD utilizando uma máquina universal de testes com capacidade para aplicação de força de até 30 toneladas, dirigida por um sistema eletromecânico controlado por computador, equipada com células de carga cambiáveis e sensores do tipo LVDT (*Linear Variable Differential Transformer*) conectados a um programa específico para aquisição de dados.

Os ensaios de determinação do perfil de densidade foram realizados no LAIM.

4.5 Determinação do perfil de densidade dos painéis MDF

Para a determinação do perfil de densidade dos painéis MDF foram utilizados 05 corpos-de-prova (50 x 50 mm) de cada tratamento, totalizando 30 corpos-de-prova.

A determinação dos perfis de densidade foi baseada na metodologia descrita no trabalho de Surdi et al. (2014), no qual, os corpos-de-prova dos painéis MDF foram pesados e as suas dimensões (altura, largura e comprimento) mensuradas. Posteriormente, os corpos-de-prova foram analisados em densitômetro de raios X marca QMS modelo QDP-01X, onde foram encaixados no suporte metálico que continha um porta-amostras e transferidos para um compartimento interno blindado do equipamento, seguindo-se a sua calibração e o escaneamento (varredura) contínuo por um feixe de raios X colimado. Destaca-se que os corpos-de-prova ao serem encaixados no suporte metálico obedeceram ao sentido face inferior-face superior do painel em relação à passagem do feixe de raio X.

Os valores de massa específica foram determinados a cada 20 μm , ao longo da espessura dos corpos-de-prova, sendo determinados 02 diferentes parâmetros de massa específica: (i) da camada externa do painel; (ii) da camada central do painel. A média da massa específica entre os primeiros 02 mm de cada face foi considerada como sendo o valor da camada externa do painel (Figura 6). Para a construção dos gráficos de perfis de densidade dos painéis MDF foi utilizado o programa Office Excel.

Figura 6 – Exemplo de perfil de densidade do painel MDF: Camada Externa (a); e camada central (b).

4.6 Determinação da razão de compactação dos painéis MDF

A razão de compactação dos painéis MDF foi determinada através da eq. (4):

$$R_C = \frac{ME_P}{DB_M} \quad (4)$$

onde:

R_C = Razão de compactação;

ME_P = Massa específica efetiva do painel MDF, em kg/m³;

DB_M = densidade básica dos cavacos da mistura de matérias-primas, em kg/m³.

4.7 Tratamentos adotados e análise dos dados experimentais

Na manufatura dos painéis foram adotados 06 tratamentos, conforme descrito na Tabela 1. Para cada tratamento foram adotadas 03 repetições, com a exceção do tratamento T1 que teve 02 repetições, totalizando 17 painéis de MDF.

Tabela 1 – Tratamentos utilizados na manufatura das chapas MDF

Tratamento	Espessura nominal (mm)	Massa específica nominal (kg/m ³)	Proporção de mistura de fibras (%)			Sigla da Proporção
			TOR	LAM	MIX	
T1	12	800	15	15	70	A
T2	15	700	25	0	75	B
T3	15	700	0	40	60	C
T4	15	700	0	25	75	D
T5	15	800	15	15	70	A
T6	18	700	0	25	75	D

Os tratamentos adotados foram analisados por meio de 03 experimentos independentes, a saber:

Experimento 1 – composto pelos tratamentos T2, T3 e T4, compreendendo painéis manufaturados com massa específica nominal de 700 kg/m³, espessura nominal de 15 mm e 03 proporções de fibras (B, C e D), respectivamente. Esse experimento foi concebido com a finalidade de verificar o efeito das diferentes proporções de fibras sobre as propriedades físicas e mecânicas dos painéis.

Experimento 2 – composto pelos tratamentos T1 e T5, compreendendo painéis manufacturados com massa específica nominal de 800 kg/m^3 , uma proporção de mistura de fibras (A) e 02 espessuras nominais (12 mm e 15 mm), respectivamente. Esse experimento foi concebido com a finalidade de verificar o efeito das diferentes espessuras dos painéis sobre as suas propriedades físicas e mecânicas.

Experimento 3 – composto pelos tratamentos T4 e T6, compreendendo painéis manufacturados com massa específica nominal de 700 kg/m^3 , uma proporção de mistura de fibras (D) e 02 espessuras nominais (15 mm e 18 mm), respectivamente. Esse experimento foi concebido com a finalidade de verificar o efeito das diferentes espessuras dos painéis sobre as suas propriedades físicas e mecânicas.

Para verificar o efeito dos tratamentos de cada experimento sobre as propriedades dos painéis MDF foi realizada uma análise de variância (ANOVA) e, posteriormente, aplicado o teste de *Tukey* para detectar diferenças entre médias, conduzido ao nível de 5% de probabilidade de erro.

Os valores médios de cada propriedade avaliada, por tratamento, foram obtidos e então confrontados com os valores especificados na norma NBR 15316-3 (ABNT, 2009), visando adquirir subsídio para inferir sobre a qualidade dos painéis manufacturados.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Avaliação dos cavacos

5.1.1 Densidade básica dos cavacos

Os valores da densidade básica dos cavacos de madeira das amostras individuais de TOR, LAM e MIX estão presentes na Tabela 2.

Tabela 2 - Valores médios da densidade básica dos cavacos de TOR, LAM e MIX

Estatística	Densidade básica (kg/m ³)		
	TOR	LAM	MIX
Média *	300 b6	290 b	650 a
CV (%)	15	3	5

*Médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente entre si ($p > 0,05$)

De acordo com o teste de *Tukey* aplicado após a análise de variância (ANEXO, TABELA 35), os valores médios de densidade básica dos cavacos provenientes de TOR e LAM não diferiram estatisticamente entre si, entretanto, diferiram estatisticamente de MIX, cujo valor médio foi superior.

A densidade básica média dos cavacos de madeira de TOR (provenientes de toras) foi de 300 kg/m³ (Tabela 2), variando entre 250 a 400 kg/m³. Vidaurre et al. (2012), encontraram valores médios de densidade básica da madeira de *Schizolobium amazonicum* de 260, 280, 270 e 300 kg/m³ aos 5, 7, 9 e 11 anos de idade, respectivamente. Jesus (2004), estudou a densidade básica da madeira de plantios de *Schizolobium amazonicum* aos 7 e aos 9 anos de idade, e encontrou valores médios variando entre 290 e 310 kg/m³, e 310 a 320 kg/m³, respectivamente.

O valor médio da densidade básica dos cavacos de LAM (provenientes de resíduos de lâminas de madeira) foi de 290 kg/m³ (Tabela 2), variando entre 280 e 310 kg/m³. Iwakiri et al. (2011), encontraram valor médio de densidade básica para lâminas de madeira de *Schizolobium amazonicum* igual a 310 kg/m³. Melo et al. (2013), avaliando a qualidade de lâminas de *Schizolobium amazonicum*, de 5 e 7 anos de idade, encontraram valores de densidade básica entre 270 e 430 kg/m³. Os autores argumentaram que essa variação pode ser causada por diferenças entre as condições edafoclimáticas dos plantios que foram estudados ou por diferenças de material genético da própria espécie. Almeida (2009) encontrou valor

médio de densidade básica de 280 kg/m³, para lâminas de madeira de *Schizolobium amazonicum*.

Observa-se que os valores médios de densidade básica encontrados no presente estudo, tanto para os cavacos provenientes de resíduos de lâminas (LAM) como para os cavacos de toras (TOR) de *Schizolobium amazonicum*, são condizentes com os dados da literatura.

O valor médio da densidade básica dos cavacos de madeira de MIX foi de 650 kg/m³, variando entre 610 e 680 kg/m³. A variação entre as densidades básicas das subamostras de cavacos de madeira de MIX, melhor expressa pelo coeficiente de variação (Tabela 2), pode ser considerada baixa, uma vez que o MIX é composto por diferentes espécies.

As espécies mais comumente exploradas e processadas mecanicamente na região de Paragominas, de acordo com autores como Verissimo et al. (2002), Silva et al. (2007) e Pezzuti e Silva (2009), e cujos resíduos madeireiros provavelmente integram o MIX são as seguintes: *Lecythis pisonis* Cambess. (sapucaia, 840 kg/m³), *Couratari macrosperma* Ducke & R. Knuth (tauari, 650 kg/m³); *Piptadenia suaveolens* Miq. (timborana, 720 kg/m³), *Swietenia macrophylla* (mogno, 460 kg/m³), *Manilkara huberi* (Huber) Standley (maçaranduba, 800 kg/m³), *Euxylophorata paraensis* Huber (pau-amarelo, 690 kg/m³), *Carapa guianensis* Aubl. (andiroba, 470 kg/m³), *Tabebuia serratifolia* (Vahl.) Nichols. (ipê-amarelo, 800 kg/m³), *Hymenolobium petraeum* Ducke (Angelim-pedra, 590 kg/m³), *Dinizia excelsa* Ducke (Angelim-vermelho, 830 kg/m³), *Cedrela odorata* (cedro-rosa, 340 kg/m³), *Cordia sp.*(freijó, 500 kg/m³), e *Hymenaea courbaril* (jatobá, 790 kg/m³) (IBDF, 1988; SOUZA; MAGLIANO; CAMARGO., 1997; LOBÃO et al., 2010).

A Tabela 3 apresenta os valores da densidade básica da mistura dos cavacos de madeira de TOR, LAM e MIX nas proporções A, B, C e D.

Tabela 3 - Valores médios da densidade básica da mistura dos cavacos de TOR, LAM e MIX nas proporções A, B, C e D

Proporção de mistura de cavacos	Densidade básica (kg/m ³)
A	544
B	563
C	506
D	560

A=70% de MIX, 15% de TOR e 15% de LAM; B=75% de MIX e 25% de TOR; C=60% de MIX e 40% de LAM; D=75% de MIX e 25% LAM.

Pode-se observar na Tabela 3 que o acréscimo de madeira de MIX nas diferentes proporções de mistura resultou em tendência de aumento nos respectivos valores de densidade

básica. Esse resultado é compatível com o esperado, pois a madeira de MIX apresentou maior valor de densidade básica em relação às demais (Tabela 2).

De outro lado, destaca-se que os valores da densidade básica das misturas de cavacos nas proporções A, B, C e D (Tabela 3), são intermediários aos da madeira de TOR/LAM e MIX (Tabela 2). Sendo assim, verifica-se que a mistura entre as madeiras foi eficiente, no que diz respeito ao alcance de valores adequados de densidade básica, os quais podem proporcionar uma razão de compactação favorável a uma boa consolidação dos painéis (*vide* item 5.3.2, Tabela 11), evitando valores de densidade da madeira extremos, ou seja, muito baixo (TOR e LAM) ou muito alto (MIX).

5.1.2 Dimensões das fibras obtidas dos cavacos

Os valores médios das dimensões das fibras inteiras dos cavacos de madeira das amostras individuais de TOR, LAM e MIX estão apresentados na Tabela 4. A Figura 7 ilustra as fibras dos referidos materiais.

Tabela 4 - Valores médios do comprimento, largura, diâmetro do lume e espessura da parede celular das fibras inteiras dos cavacos de madeira de TOR, LAM e MIX

Matéria-prima		Dimensões das Fibras			
		Comprimento (mm)	Largura	Diâmetro do lume (μ m)	Espessura da Parede
TOR	Média*	1,08 b	32,13 a	26,48 a	2,82 b
	Mínimo	0,88	24,57	17,49	1,95
	Máximo	1,23	37,43	32,50	3,54
	CV (%)	10,03	10,69	14,72	12,59
LAM	Média	1,23 b	29,96 a	25,12 a	2,41 b
	Mínimo	0,96	24,64	18,84	1,75
	Máximo	1,45	37,71	33,84	3,03
	CV (%)	11,05	12,60	17,92	16,74
MIX	Média	1,49 a	19,37 b	6,41 b	6,48 a
	Mínimo	1,10	10,73	1,12	2,97
	Máximo	2,31	30,50	21,88	11,40
	CV (%)	19,92	22,96	87,49	35,81

*Dentro da coluna, médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente entre si ($p > 0,05$)

Figura 7 – Fibras inteiras provenientes dos cavacos de madeira; (A) Parede celular e lume das fibras de LAM (400 x; barra: 100 μm); (B) Parede celular e lume das fibras de TOR (400 x; barra: 100 μm); (C) Parede celular e lume das fibras de MIX (400 x; barra: 100 μm); (D) Comprimento das fibras de LAM (25 x; barra: 500 μm); (E) Comprimento das fibras de TOR (25 x; barra: 500 μm); (F) Comprimento das fibras de MIX (25 x; barra: 500 μm).

Por meio do teste de *Tukey*, aplicado após as análises de variância efetuadas para o comprimento, largura, espessura da parede celular e diâmetro do lume das fibras (ANEXO, TABELA 36, 37, 38 e 39, respectivamente), verificou-se que os valores médios de todas as variáveis dimensionais das fibras de TOR e LAM não diferiram estatisticamente entre si, entretanto, diferiram dos encontrados para o MIX (Tabela 4). Os valores médios do comprimento e da espessura da parede das fibras do MIX foram superiores aos de TOR e LAM, observando-se o contrário para a largura das fibras e o diâmetro do lume.

A densidade básica da madeira do MIX (Tabela 2), cujo valor mostrou-se superior ao das demais madeiras (TOR e LAM), em boa parte, possivelmente, resulta da espessura das paredes das suas fibras, também, relativamente superior (Tabela 4).

O comprimento médio das fibras do MIX, superior aos de LAM e TOR, pode significar certo favorecimento, conforme o aspecto analisado. De acordo com Belini (2007), maior comprimento médio de fibras resulta em menor área aparente de fibras/feixes e isso proporciona um aumento dos espaços internos ao colchão de fibras durante a prensagem na

manufatura do MDF, facilitando a saída do vapor d'água e o alívio da pressão que se fazem presentes no centro do painel, auxiliando no processamento da cura da resina.

De acordo com Iwakiri et al. (2005), para a manufatura de painéis MDF, são desejáveis espécies com parede celular fina, por se curvarem e colapsarem mais facilmente, resultando em maior área de contato, contribuindo para maior quantidade de pontes de hidrogênio disponíveis e tornando as ligações entre fibras mais resistentes. Neste aspecto destacado, pode-se dizer que as fibras de TOR e LAM, por possuírem paredes mais finas que as do MIX, podem apresentar certa vantagem.

Os valores médios do comprimento das fibras de LAM, TOR e MIX encontrados no presente estudo encontram-se dentro da faixa entre 0,5 e 2,5 mm, citada por Burger e Richter (1991), para espécies angiospermas dicotiledôneas (folhosas).

As variáveis dimensionais das fibras mensuradas para o MIX apresentaram altos valores de coeficiente de variação (CV), sendo todos superiores aos obtidos para TOR e LAM (Tabela 4), destacando-se o CV (87,49%) encontrado para variável diâmetro do lume. De acordo com Fernando et al. (2011), a heterogeneidade presente em fibras de populações de espécies nativas ocorre devido a origem morfológica das fibras, como lenho inicial, lenho tardio e lenho de reação. Sendo assim, as fibras podem apresentar diferentes características e propriedades, incluindo a espessura e a rigidez.

A Tabela 5 apresenta valores das dimensões das fibras de madeira de *Schizolobium amazonicum* encontrados na literatura.

Tabela 5 - Dimensões das fibras de madeira de *Schizolobium amazonicum* encontrados na literatura

Autor	Idade (anos)	Comprimento (mm)	Largura	Diâmetro do lume	Espessura da parede
				(μm)	
Vidaurre (2010)	5	0,98	32,75	25,08	3,94
	7	1,09	32,84	25,08	3,88
	9	1,04	32,84	25,08	3,79
	11	1,16	32,74	25,17	3,78
Jesus (2004)	7	1,11	26,72	...	4,62
	9	1,18	26,55	...	4,64
Bianche (2009)	...	1,02	42,93	36,09	3,42
Forzani (2007)	...	1,07	33,26	25,56	3,85
Terezo (2010)	6	1,08	30,36	26,27	7,09
	10	1,16	32,23	24,13	8,09
	19	1,31	35,17	29,22	5,94
	28	1,28	35,85	29,9	5,95

Nota: ... Informação não disponibilizada pelo autor

Comparando os dados da Tabela 5 com os da Tabela 4, de modo geral, pode-se dizer que os mesmos são compatíveis. Exceção é o caso dos valores da espessura da parede celular das fibras encontrados no presente estudo, os quais são algo inferiores aos demais, porém, muito evidentes quando comparados aos obtidos por Terezo (2010). Nos casos da largura e diâmetro do lume das fibras, também, verifica-se que os valores encontrados no presente estudo são algo inferiores aos obtidos por Bianche (2009).

5.2 Caracterização das fibras após o desfibramento industrial

Os valores médios das dimensões das fibras após o desfibramento industrial são apresentados na Tabela 6.

Tabela 6 – Valores médios do comprimento, largura, diâmetro do lume e espessura da parede celular das fibras após o desfibramento industrial dos cavacos

Proporção de mistura das fibras		Dimensões das fibras			
		Comprimento (mm)	Largura	Diâmetro do lume (μm)	Espessura da Parede
A	Média	1,07	20,20	10,79	4,62
	CV (%)	19,61	25,11	59,37	29,17
B	Média	0,93	25,30	15,95	4,67
	CV (%)	9,39	5,74	18,83	21,14
C	Média	0,98	27,44	18,20	4,70
	CV (%)	9,39	28,15	48,74	27,57
D	Média	1,07	23,08	12,41	5,33
	CV (%)	8,47	13,34	25,63	7,56

A=70% de MIX, 15% de TOR e 15% de LAM; B=75% de MIX e 25% de TOR; C=60% de MIX e 40% de LAM; D=75% de MIX e 25% LAM.

Ao analisar os valores médios do comprimento das fibras após o desfibramento industrial dos cavacos presentes na Tabela 6, observa-se que houve uma redução nos valores dessa variável, quando comparados aos obtidos das fibras inteiras dos cavacos de TOR, LAM e MIX (Tabela 4). A redução do comprimento observada, ainda mais evidente ao analisar os dados da Tabela 7, é resultante da quebra das fibras, ocasionada na etapa de desfibramento industrial dos cavacos de madeira. Outros autores, tais como Eleotério (2000) e Belini (2007), também, constaram o mesmo fato.

Os valores médios da largura, diâmetro do lume e espessura da parede celular das fibras apresentados na Tabela 6 são intermediários aos encontrados para LAM, TOR e MIX (Tabela 4), provavelmente, devido às misturas entre as matérias-primas.

De acordo com Belini (2007) a quantidade de fibras quebradas aumenta com o aumento da intensidade do processo de refinação. Conforme Myers (1987) a refinação diminui o comprimento das fibras, entretanto, apresenta pouca influência sobre o diâmetro. Segundo Hua et al. (2010), fibras compridas demais poderão afetar negativamente a superfície do painel. Em caso contrário, a resistência do painel poderá ser reduzida.

Na Tabela 7, encontra-se a distribuição das frequências absoluta e relativa do comprimento das fibras após o processo de desfibramento.

Tabela 7 - Distribuição das frequências absoluta (ABS) e relativa (REL) do comprimento das fibras da mistura de TOR, LAM e MIX nas proporções A, B, C e D, após o desfibramento industrial dos cavacos

Classe de comprimento (mm)	Proporção de mistura das fibras							
	A		B		C		D	
	Abs	Rel (%)	Abs	Rel (%)	Abs	Rel (%)	Abs	Rel (%)
0,0 0,4	14	5,6	11	4,4	9	3,6	1	0,4
0,4 0,8	52	20,8	69	27,6	49	19,6	53	21,2
0,8 1,2	104	41,6	113	45,2	138	55,2	106	42,4
1,2 1,6	45	18,0	47	18,8	45	18,0	74	29,6
1,6 2,0	30	12,0	9	3,6	9	3,6	14	5,6
2,0 2,4	5	2,0	1	0,4	0	0,0	2	0,8

A=70% de MIX, 15% de TOR e 15% de LAM; B=75% de MIX e 25% de TOR; C=60% de MIX e 40% de LAM; D=75% de MIX e 25% LAM.

Ao analisar o comprimento das fibras após o desfibramento industrial em distribuição de classes, observa-se que a maior frequência está na classe 0,8 | 1,2 mm em todas as proporções de mistura das fibras, e as mais baixas frequências estão nas classes 0,0 | 0,4 mm e 2,0 | 2,4 mm. A baixa frequência na classe inferior (0,0 | 0,4 mm) demonstra que as condições de desfibramento não causaram danos severos ao comprimento das fibras. A baixa frequência na classe superior (2,0 | 2,4 mm) apenas induz à possibilidade de baixa incidência de espécies com fibras de alto comprimento.

De modo geral, as fibras foram quebradas em suas extremidades (Figura 8-A) e em menor frequência as fibras foram quebradas no centro (Figura 8-B), demonstrando boa flexibilidade, cuja característica é desejável para a manufatura de painéis MDF.

Figura 8 – Fibras obtidas após o desfibramento industrial; (A) Fibra quebrada no centro (25 x; barra: 500 µm); (B) Fibra quebrada em sua extremidade (400 x; barra: 100 µm).

5.3 Propriedades tecnológicas dos painéis

5.3.1 Massa específica dos painéis MDF

Os valores médios da massa específica dos painéis MDF do Experimento 1, estão presentes na Tabela 8.

Tabela 8 - Valores médios da massa específica dos painéis MDF do Experimento 1

Tratamento	Proporção de mistura de fibras	Espessura do painel	Massa específica (kg/m ³)	Teor de umidade (%)
T2	B	15	730 a	8,4
T3	C	15	710 a	8,7
T4	D	15	710 a	8,7

Médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente entre si ($p > 0,05$). B=75% de MIX e 25% de TOR; C=60% de MIX e 40% de LAM; D=75% de MIX e 25% LAM.

A análise de variância da massa específica dos painéis MDF que compõem o Experimento 1 (ANEXO, TABELA 40), indicou que não houve diferenças significativas entre os tratamentos.

A equivalência estatística dos valores médios da massa específica dos painéis dos tratamentos T2, T3 e T4 (Tabela 8), produzidos com a mesma espessura nominal (15 mm), revela que não houve influência das diferentes proporções de mistura de fibras (respectivamente B, C e D) sobre a variável analisada.

Os valores médios da massa específica dos painéis MDF do Experimento 2, estão presentes na Tabela 9.

Tabela 9 - Valores médios da massa específica dos painéis MDF do Experimento 2

Tratamento	Proporção de mistura de fibras	Espessura (mm)	Massa específica (kg/m³)	Teor de umidade (%)
T1	A	12	810 a	7,9
T5	A	15	820 a	7,6

Médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente entre si ($p > 0,05$). A=70% de MIX, 15% de TOR e 15% de LAM

A análise de variância da massa específica dos painéis MDF que compõem o Experimento 2 (ANEXO, TABELA 41), indicou que não houve diferenças significativas entre os tratamentos.

A equivalência estatística dos valores médios da massa específica dos painéis dos tratamentos T1 e T5 (Tabela 9), produzidos com a mesma proporção de mistura de fibras (A), revela que não houve influência das diferentes espessuras (respectivamente, 12 e 15 mm) sobre a variável analisada.

Os valores médios da massa específica dos painéis MDF do Experimento 3, estão presentes na Tabela 10.

Tabela 10 - Valores médios da massa específica dos painéis MDF do Experimento 3

Tratamento	Proporção de mistura de fibras	Espessura (mm)	Massa específica (kg/m³)	Teor de umidade (%)
T4	D	15	710 a	8,7
T6	D	18	710 a	8,5

Médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente entre si ($p > 0,05$). D=75% de MIX e 25% LAM.

A análise de variância da massa específica dos painéis MDF que compõem o Experimento 3 (ANEXO, TABELA 42), indicou que não houve diferenças significativas entre os tratamentos.

A equivalência estatística dos valores médios de massa específica dos painéis dos tratamentos T4 e T6 (Tabela 10), os quais foram produzidos com a mesma proporção de mistura de fibras (D), porém, com espessuras diferentes (respectivamente, 15 e 18 mm), revela que não houve influência da espessura sobre a variável analisada.

Cabe destacar que os valores médios da massa específica dos painéis MDF de todos os tratamentos (T1 a T6) foram muito próximos dos respectivos valores da massa específica nominal (Tabela 1), ou seja, da massa específica planejada para os painéis, demonstrando que o processo de produção industrial foi bem conduzido.

A norma NBR 15316-1 (ABNT, 2009) classifica painéis MDF com massa específica na faixa entre 650 e 800 kg/m³ como *standard*. Desta forma, considerando os valores médios

da massa específica dos painéis de todos os tratamentos, pode-se dizer que os mesmos enquadraram-se na referida classificação.

Os valores médios do teor de umidade dos painéis MDF de todos os tratamentos variaram entre 7,6 e 8,7%. Sendo assim, encontram-se dentro da faixa de valores (4 a 11%) estabelecida nos requisitos gerais da norma NBR 15316-2 (ABNT, 2009), bem como estão de acordo com os valores encontrados na literatura.

Barbosa (2010), estudando painéis MDF de 18 mm de espessura e densidade nominal variando entre 650 e 800 kg/m³, depois de climatizados em temperatura de 20±3°C e umidade relativa de 65±5%, encontrou valores de teor de umidade variando entre 8,1 e 9,1%.

Torquato (2008), avaliando a qualidade de painéis MDF de 15 mm de espessura e com massa específica entre 690 e 720 kg/m³, encontrou valores de teor de umidade variando entre 9,0 e 10,2%.

5.3.2 Razão de compactação dos painéis MDF

Na Tabela 11 estão presentes os valores das razões de compactação para cada tratamento, calculados pela relação entre a densidade nominal (Tabela 1) ou efetiva (Tabelas 8, 9 e 10) dos painéis MDF e a densidade básica da mistura dos cavacos de madeira de TOR, LAM e MIX, conforme a proporção adotada (Tabela 3).

Tabela 11 - Valores das razões de compactação nominal e efetiva dos painéis MDF

Tratamento	Razão de compactação	
	Nominal	Efetiva
T1	1,5	1,5
T2	1,2	1,3
T3	1,4	1,4
T4	1,3	1,3
T5	1,5	1,5
T6	1,3	1,3

De acordo com os dados da Tabela 11, o valor da razão de compactação efetiva dos painéis MDF variou entre 1,3 e 1,5. Em todos os casos a razão nominal foi atingida, mas, para o tratamento 2, a razão de compactação efetiva superou ligeiramente a nominal.

Destaca-se que a razão de compactação efetiva dos painéis de todos os tratamentos atingiu ou superou o valor de 1,3, sugerido por autores como Moslemi (1974a) e Iwakiri (2005) como um mínimo necessário para assegurar uma área de contato suficiente entre as fibras na prensagem do colchão e proporcionar a adesão (fibra-resina-fibra).

5.3.3 Perfil de densidade dos painéis MDF

A avaliação do perfil de densidade dos painéis MDF é considerada uma importante ferramenta de controle de processo, utilizada para direcionar as ações e ajustes subsequentes na unidade fabril, auxiliando na tomada de decisões sobre a calibração do ciclo de prensagem visando garantir a qualidade desejada para os painéis produzidos (BELINI, 2007; BELINI, 2012).

O perfil de densidade dos painéis MDF é fortemente influenciado pelos parâmetros do ciclo de prensagem (tempo de fechamento da prensa, pressão, temperatura e tempo de prensagem), teor de umidade do colchão de fibras e teor de resina aplicado (BOEHME, 1992).

A Figura 9 (A a F) apresenta os perfis de densidade dos painéis MDF representativos de cada tratamento (T1 a T6, respectivamente).

Figura 9 - Perfil de densidade dos tratamentos. (A) Tratamento 1; (B) Tratamento 2; (C) Tratamento 3; (D) Tratamento 4; (E) Tratamento 5; (F) Tratamento 6

Analisando a Figura 9 (A a F, tratamentos 1 a 6) nota-se que a massa específica de uma das faces dos painéis MDF é maior que a da outra face. Aquela que apresenta maior massa específica é chamada de face inferior. Esta constatação é compatível com o fato dos painéis terem sido produzidos em um processo descontínuo utilizando uma prensa plana de pratos múltiplos. Ao ser carregado para a prensa ocorre que a face inferior do colchão de fibras entra em contato com o prato inferior da prensa antes da superior, iniciando seu contato com o prato superior apenas quando a prensa é fechada. Devido ao maior tempo de contato da face inferior do painel com o prato quente inferior da prensa, as fibras nesse lado tornam-se mais plasticizadas e menos resistentes a compressão, resultando em um maior contato entre as tais fibras e, conseqüentemente, no aumento da densificação dessa face em relação à outra.

Observa-se na Figura 9 (A a F) que os perfis de densidade dos painéis de todos os tratamentos revelaram alta densificação nas faces e baixa densificação no centro. Esse modelo está de acordo com autores tais como Wang et al. (2004) e Wilczynski e Kociszewski (2007), os quais afirmam que painéis MDF possuem camadas de alta densidade nas faces e baixa densidade na camada central, sendo esta, também conhecida como camada interna ou miolo.

Eleotério (2000), Belini (2007), Torquato (2008) e Ferreira (2010), encontraram modelos para perfis de densidades de painéis MDF apresentando-se em forma semelhante a letra “M”, ou seja, iniciando o perfil com baixa densidade em ambas as camadas superficiais (superior e inferior), seguindo crescente até atingir a densidade máxima (picos) e, subsequentemente, diminuindo até o centro do painel.

Os painéis MDF do presente estudo, talvez, por terem sido submetidos ao lixamento superficial para atingirem a espessura final desejada, não apresentaram perfis de densidade no formato da letra “M” bem definido, apresentando-se com um formato mais semelhante ao da letra “U”. Em outras palavras, a baixa densidade inicial nas bordas, que poderia ser esperada para os painéis do presente estudo, pode ter sido removida pela ação da lixa.

Por outro lado, o formato do perfil de densidade, encontrado no presente estudo (letra “U”), pode estar relacionado a um curto tempo de fechamento da prensa. Na prensagem, inicialmente, por contato e condução, os pratos quentes transferem calor para as camadas mais externas do colchão de fibras, porém, ao longo da prensagem o calor é transferido com maior eficiência para o centro do colchão por convecção do vapor d’água, resultante da umidade presente nas fibras sob ação da temperatura (KELLY, 1977; CAI et al., 2006b). Com um curto tempo de fechamento da prensa, o calor necessário para plasticizar as fibras presentes no centro do colchão tem menor tempo para atingir essa camada, a qual, ainda fria, resiste mais à compressão em relação às camadas externas. Quando o calor chega ao centro, o painel já

atingiu a espessura final desejada, ou seja, os pratos da prensa permanecem limitados pelos separados de aço, e essa camada não pode mais ser comprimida. Nessas condições de produção, os painéis tendem a apresentar, ao extremo, superfícies com alta densidade e a camada central com baixa densidade, exibindo um perfil de densidade semelhante à letra “U” (MOSLEMI, 1974b). Painéis com esse tipo de perfil de densidade poderão ter as suas propriedades de flexão estática maximizadas, porém, poderão ter prejuízo na resistência da ligação interna.

Os valores médios de massa específica da camada externa e da camada central dos painéis MDF do Experimento 1, obtidos pela densitometria de raios X, estão presentes na Tabela 12.

Tabela 12 - Valores médios de massa específica da camada externa e camada central dos painéis MDF do Experimento 1

Tratamento	Proporção de mistura de fibras	Espessura do painel	Massa específica (kg/m ³)	
			Camada externa	Camada central
T2	B	15	804 a (1,21)	662 a (0,70)
T3	C	15	779 ab (3,18)	624 c (1,89)
T4	D	15	756 b (2,22)	640 b (0,88)

Dentro da coluna, médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente entre si ($p > 0,05$). Valores entre parênteses correspondem ao coeficiente de variação (%). B=75% de MIX e 25% de TOR; C=60% de MIX e 40% de LAM; D=75% de MIX e 25% LAM.

Por meio do teste de *Tukey*, aplicado após as análises de variância (ANEXO, TABELA 43 e 44, respectivamente), verificou-se que o valor médio da massa específica da camada externa dos painéis MDF do tratamento T3 equivaleu-se estatisticamente aos do T2 e T4, entretanto, ambos (T2 e T4) diferiram entre si. Por outro lado, observa-se que o valor médio da massa específica da camada central dos painéis MDF diferiu estatisticamente entre todos os tratamentos, tendo os painéis do tratamento T2 apresentado o maior valor, seguido pelos painéis dos tratamentos T4 e T3. Esses resultados demonstram que houve influência das diferentes proporções de mistura de fibras (B, C e D) sobre ambas as variáveis analisadas e, portanto, sobre os perfis de densidade dos painéis.

Na Tabela 13, encontram-se os valores médios de massa específica da camada externa e da camada central dos painéis MDF do Experimento 2, obtidos pela densitometria de raios X.

Tabela 13 - Valores médios de massa específica da camada externa e camada central dos painéis MDF do Experimento 2

Tratamento	Proporção de mistura de fibras	Espessura do painel	Massa específica (kg/m ³)	
			Camada externa	Camada central
T1	A	12	852 a (1,16)	725 a (0,96)
T5	A	15	863 a (0,49)	716 a (1,40)

Dentro da coluna, médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente entre si ($p > 0,05$). Valores entre parênteses correspondem ao coeficiente de variação (%). A=70% de MIX, 15% de TOR e 15% de LAM

A análise de variância da massa específica da camada externa e da camada central dos painéis MDF que compõem o Experimento 2 (ANEXO, TABELA 45 e 46, respectivamente), indicou que não houve diferenças significativas entre os tratamentos para ambas as variáveis.

A equivalência estatística dos valores médios da massa específica da camada externa e camada central dos painéis MDF dos tratamentos T1 e T5 (Tabela 13), produzidos com a mesma proporção de fibras (A), entretanto com espessura nominal diferente (12 e 15 mm, respectivamente), revela que não houve influência das diferentes espessuras sobre a variável analisada e, portanto, sobre os perfis de densidade dos painéis.

Na Tabela 14, encontram-se os valores médios de massa específica da camada externa e camada central dos painéis MDF do Experimento 3, obtidos pela densitometria de raios X.

Tabela 14 - Valores médios de massa específica da camada externa e camada central dos painéis MDF do Experimento 3

Tratamento	Proporção de mistura de fibras	Espessura do painel	Massa específica (kg/m ³)	
			Camada externa	Camada central
T4	D	15	756 b (2,22)	640 a (1,40)
T6	D	18	801 a (2,08)	622 b (2,43)

Dentro da coluna, médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente entre si ($p > 0,05$). Valores entre parênteses correspondem ao coeficiente de variação (%). D=75% de MIX e 25% LAM.

Por meio do teste de *Tukey*, aplicado após as análises de variância efetuadas para as massas específicas da camada externa e da camada central dos painéis MDF do Experimento 3 (ANEXO, TABELA 47 e 48, respectivamente), verificou-se que o valor médio de massa específica da camada externa dos painéis do tratamento T4 foi inferior ao obtido para os painéis do tratamento T6, observando-se o contrário para a camada central (Tabela 14).

A diferença estatística dos valores médios das massas específicas da camada externa e da camada central dos painéis MDF dos tratamentos T4 e T6, produzidos com a mesma proporção de mistura de fibras (D), revela que houve influência das diferentes espessuras dos

painéis (respectivamente, 15 e 18 mm) sobre ambas as variáveis analisadas e, portanto, sobre os perfis de densidade dos painéis.

Nota-se que o valor médio da massa específica da camada central aumentou com a redução da espessura do painel (Tabela 14). Essa observação está de acordo com Kelly (1977) e Maloney (1977), os quais afirmam ser comum painel de menores espessuras apresentarem valores relativamente maiores de massa específica na camada central. Embora não tenha se verificado diferenças estatísticas entre os valores médios da massa específica da camada externa e camada central dos painéis MDF do Experimento 2 (Tabela 13, tratamentos T1 e T5), pôde-se observar que o valor médio da massa específica da camada central tendeu a aumentar com a redução da espessura do painel.

Por serem submetidos ao mesmo ciclo de prensagem, pode-se inferir que o calor emitido pelos pratos da prensa atingiu com maior rapidez o centro dos painéis de menor espessura, de modo que a lignina das fibras presentes na camada central desses painéis tornaram-se mais plasticizadas e menos resistentes à compressão. Essa condição, provavelmente aumentou o contato entre fibras, diminuindo a quantidade de espaços vazios no interior do painel, e por consequência, aumentando a massa específica da camada central.

De acordo com os dados das Tabelas 12, 13 e 14, os painéis MDF de todos os tratamentos mostraram elevados valores médios para massa específica na camada externa em relação à camada central. De acordo com Eleotério (2000), a alta densificação nas camadas externas torna-se uma característica favorável presente nos painéis MDF, pois resulta na melhoria das propriedades de flexão estática, além de que, em função da menor quantidade de espaços vazios, permite a pintura de maneira mais econômica, bem como superfícies usinadas com menor rugosidade.

Os valores médios da massa específica das camadas externas (entre 756 kg/m³ e 863 kg/m³) e centrais (entre 622 kg/m³ e 725 kg/m³) encontrados para os painéis MDF do presente estudo foram relativamente inferiores aos valores sugeridos por Halvarsson (2010). Segundo o mesmo autor, os perfis de densidade característicos em painéis a base de madeira apresentam massa específica na camada externa variando na faixa de 900 kg/m³ a 1000 kg/m³ e na camada central entre 650 kg/m³ e 800 kg/m³. Entretanto, cabe resaltar que os painéis MDF do presente estudo foram classificados como *standard* (painéis com massa específica média entre 650 e 800 kg/m³). Sendo assim, os valores de massa específica encontrados para as camadas externa e interna podem ser considerados aceitáveis.

5.3.4 Absorção de água

Os valores médios de absorção de água dos painéis MDF do Experimento 1, após duas horas (AA2h) e vinte e quatro horas de imersão (AA24h), estão apresentados na Tabela 15.

Tabela 15 - Valores médios de absorção de água dos painéis MDF do Experimento 1

Tratamento	Proporção de mistura de fibras	Espessura do painel (mm)	AA2h	AA24h
			%	
T2	B	15	5,4 a	25,1 a
T3	C	15	8,1 a	35,1 a
T4	D	15	7,0 a	32,3 a

Dentro da coluna, médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente entre si ($p > 0,05$). B=75% de MIX e 25% de TOR; C=60% de MIX e 40% de LAM; D=75% de MIX e 25% LAM.

A análise de variância de AA2h e AA24h dos painéis MDF que compõem o Experimento 1 (ANEXO, TABELA 49 e 50), indicou que não houve diferenças significativas entre os tratamentos.

A equivalência estatística dos valores médios de AA2h e AA24h dos painéis MDF dos tratamentos T2, T3 e T4 (Tabela 15), produzidos com a mesma espessura (15 mm) e mesma massa específica nominal (700 kg/m^3), revela que não houve influência das diferentes proporções de mistura de fibras (respectivamente B, C e D) sobre as variáveis analisadas.

Os valores médios de AA2h e AA24h dos painéis MDF do Experimento 2 encontram-se na Tabela 16.

Tabela 16 - Valores médios de absorção de água dos painéis MDF do Experimento 2

Tratamento	Proporção de mistura de fibras	Espessura do painel (mm)	AA2h	AA24h
			%	
T1	A	12	11,1 a	26,1 a
T5	A	15	7,8 b	21,2 b

Dentro da coluna, médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente entre si ($p > 0,05$). A=70% de MIX, 15% de TOR e 15% de LAM

De acordo com o teste de *Tukey* aplicado após a análise de variância (ANEXO, TABELA 51 e 52), os valores médios de AA2h e AA24h dos painéis MDF dos tratamentos T1 e T5, produzidos com a mesma proporção de mistura de fibras (A) e mesma massa específica nominal (800 kg/m^3), diferiram estatisticamente entre si, indicando que houve influência da espessura sobre as propriedades avaliadas. De acordo com a Tabela 16, o

tratamento T1, constituído de painéis de 12 mm, apresentou valor médio superior ao tratamento T5 em ambas as variáveis.

De acordo com Del Menezzi (2004), relata que a absorção de água do painel é um fenómeno muito mais físico que químico e está relacionado à porosidade (espaços vazios) dos painéis e da madeira propriamente dita. Quando o painel está submerso, a água líquida ocupa os espaços vazios formados entre as fibras e o interior das células da madeira, onde permanece pela ação de forças capilares.

Krzysik et al. (2001), produzindo painéis MDF de 6, 13 e 19 mm a partir de madeira de *Eucalyptus saligna*, também verificaram que com o aumento da espessura houve redução dos valores de AA24h.

Os valores médios de AA2h e AA24h dos painéis MDF do Experimento 3 encontram-se na Tabela 17.

Tabela 17 - Valores médios de absorção de água dos painéis MDF do Experimento 3

Tratamento	Proporção de mistura de fibras	Espessura do painel (mm)	AA2h	AA24h
			%	
T4	D	15	7,0 a	32,3 a
T6	D	18	4,5 a	26,7 a

Dentro da coluna, médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente entre si ($p > 0,05$). D=75% de MIX e 25% LAM.

A análise de variância de AA2h e AA24h dos painéis MDF que compõem o Experimento 3 (ANEXO, TABELA 53 e 54), indicou que não houve diferenças significativas entre os tratamentos.

A equivalência estatística do valor médio de AA2h e AA24h dos painéis dos tratamentos T4 e T6, produzidos com a mesma proporção de mistura de fibras (D) e mesma massa específica (700 kg/m^3), revela que não houve influência das diferentes espessuras (respectivamente, 15 e 18 mm) sobre as variáveis analisadas.

Belini e Tomazello Filho (2010) comparando as propriedades tecnológicas de painéis MDF produzidos em escala laboratorial e industrial, com fibras de *Eucalyptus grandis* e densidade nominal de 700 kg/m^3 , encontraram valores médios de AA24h iguais a 33,7% e 56,1%, respectivamente.

Ferreira (2010), manufacturando painéis MDF com fibras de *Pinus taeda*, e massa específica nominal de 700 kg/m^3 , encontrou valores médios de AA24h variando entre 31 % e 51,4 %.

A norma NBR 15316-2 (ABNT, 2009) não especifica valores para absorção de água de painéis MDF. Entretanto, considerando que os valores médios de AA24h dos painéis MDF de todos os tratamentos (T1 a T6) variaram de 21,2% a 35,1%, pode-se dizer que os mesmos estão mais coerentes com os menores valores encontrados na literatura.

5.3.5 Inchamento em espessura

O processo de inchamento do painel inicia-se com a água ocupando os espaços vazios contidos no seu interior, o que implica apenas em um pequeno inchamento. Subsequentemente, a água que ocupou os espaços vazios se difunde para a parede celular da madeira com maior intensidade, causando assim aumento significativo do inchamento do painel (DEL MENEZZI, 2004).

De acordo com Surdi (2012), o inchamento em espessura do painel está relacionado basicamente ao inchamento da madeira devido à adsorção de moléculas de água junto aos sítios de sorção que provoca o afastamento das cadeias de celulose e hemicelulose; e ao inchamento devido à liberação das tensões de compressão impostas ao painel durante a prensagem.

Os valores médios de inchamento em espessura dos painéis MDF do Experimento 1, após 2 horas de imersão (IE2h) e vinte e quatro horas de imersão (IE24h), estão apresentados na Tabela 18.

Tabela 18 - Valores médios de inchamento em espessura dos painéis MDF do Experimento 1

Tratamento	Proporção de mistura de fibras	Espessura do painel (mm)	IE2h	IE24h
			%	
T2	B	15	0,82 a	6,42 a
T3	C	15	1,43 a	5,71 a
T4	D	15	1,05 a	6,43 a

Dentro da coluna, médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente entre si ($p > 0,05$). B=75% de MIX e 25% de TOR; C=60% de MIX e 40% de LAM; D=75% de MIX e 25% LAM.

A análise de variância para a variável IE2h e IE24h realizada para os painéis MDF do Experimento 1 (ANEXO, TABELA 56 e 57, respectivamente), indicou que não houve diferença estatística entre os tratamentos nos dois casos analisados.

A equivalência estatística dos valores médios de IE2h e IE24h dos painéis MDF dos tratamentos T2, T3 e T4 (Tabela 18), produzidos com a mesma espessura (15 mm) e massa específica nominal (700 kg/m^3), revela que não houve influência das diferentes proporções de fibras (respectivamente, C, B e D) sobre as referidas variáveis.

Os valores médios de IE2h e IE24h dos painéis MDF do Experimento 2, estão presentes na Tabela 19.

Tabela 19 - Valores médios de inchamento em espessura dos painéis MDF o Experimento 2

Tratamento	Proporção de mistura de fibras	Espessura do painel (mm)	IE2h	IE24h
			%	
T1	A	12	2,46 a	9,22 a
T5	A	15	1,43 a	6,57 b

Dentro da coluna, médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente entre si ($p > 0,05$). A=70% de MIX, 15% de TOR e 15% de LAM

A análise de variância realizada para o IE2h e IE24h (ANEXO, TABELA 57 e 58, respectivamente), indicou que houve diferença estatística entre os tratamentos apenas para a variável IE24. Neste caso, os painéis MDF do tratamento T1 apresentaram valor médio superior ao obtido no tratamento T5.

A diferença estatística do valor médio de IE24h dos painéis dos MDF dos tratamentos T1 e T5 (Tabela 19), produzidos com a mesma proporção de mistura de fibras (A) e mesma massa específica nominal (800 kg/m^3), revela que houve influência das diferentes espessuras (respectivamente, 12 e 15 mm) sobre a variável analisada.

Os valores médios de IE2h e IE24h dos painéis MDF do Experimento 3, estão presentes na Tabela 20.

Tabela 20 - Valores médios de inchamento em espessura dos painéis MDF do Experimento 3

Tratamento	Proporção de mistura de fibras	Espessura do painel (mm)	IE2h	IE24h
			%	
T4	D	15	1,09 a	6,75 a
T6	D	18	0,57 b	4,36 b

Dentro da coluna, médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente entre si ($p > 0,05$). D=75% de MIX e 25% LAM.

De acordo com o teste de *Tukey* aplicado após a análise de variância efetuada para a variável IE2h e IE24h (ANEXO, TABELA 59 e 60, respectivamente), os valores médios dos painéis MDF do tratamento T4 diferiram estatisticamente e foram superiores aos obtidos no tratamento T6, consideradas ambas as variáveis analisadas.

A diferença estatística dos valores médios de IE2h e IE24h dos painéis dos tratamentos T4 e T6 (Tabela 20), produzidos com a mesma proporção de mistura de fibras (D) e massa específica nominal (700 kg/m^3), revela que houve efeito das diferentes espessuras (respectivamente, 15 e 18 mm) sobre as variáveis analisadas.

Observa-se que tanto no Experimento 2 como no Experimento 3 (Tabela 19 e 20, respectivamente), os painéis de maior espessura apresentaram valores médios de IE24h estatisticamente inferiores aos painéis de menor espessura. Sendo assim, pode-se inferir que, quando manufaturados em condições iguais, painéis de menor espessura tendem a apresentar maiores valores de inchamento do que painéis de maior espessura. Tal tendência também foi observada por Krzysik et al. (2001), os quais constataram que o aumento na espessura dos painéis MDF (6, 13 e 19 mm) reduziu os seus valores de inchamento em espessura (11, 6 e 3%, respectivamente).

Akgül et al. (2007), produzindo painéis MDF a partir da madeira de *Quecus robur*, obtiveram valores médios de IE24h variando de 4,50 a 13,49%. Belini (2007), avaliando o efeito das condições de desfibramento dos cavacos sobre as propriedades de painéis MDF produzidos com fibras de *Eucaliptus grandis*, encontrou valores médios para IE24h variando entre 5,8 e 8,6%. Considerando que os valores médios de IE24h dos painéis de todos os tratamentos (T1 a T6) variaram entre 4,36% e 9,22%, pode-se dizer que os mesmos são compatíveis com os dados da literatura.

A norma NBR 15316-2 (ABNT, 2009) estabelece o valor máximo de 12% para o IE24h de painéis MDF com espessura entre 12 e 19 mm, para o uso em móveis sob condições secas. Observa-se que os painéis MDF de todos os tratamentos (T1 a T6) apresentaram valores médios abaixo do valor máximo estabelecido pela norma e desta forma puderam atendê-la.

5.3.6 Módulo de ruptura à flexão estática

Os valores médios de Módulo de Ruptura (MOR) à flexão estática dos painéis MDF do Experimento 1, estão presentes na Tabela 21.

Tabela 21 - Valores médio de módulo de ruptura a flexão estática dos painéis MDF do Experimento 1

Tratamento	Proporção de mistura de fibras	Espessura do painel (mm)	MOR (N/mm ²)
T2	B	15	23,35 b
T3	C	15	27,65 a
T4	D	15	23,17 b

Médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente entre si ($p > 0,05$). B=75% de MIX e 25% de TOR; C=60% de MIX e 40% de LAM; D=75% de MIX e 25% LAM.

Por meio do teste de *Tukey* aplicado após a análise de variância efetuada para a variável MOR (ANEXO, TABELA 61), verificou-se que os valores médios dos painéis MDF

dos tratamentos T2 e T4 não diferiram estatisticamente entre si, contudo, ambos diferiram de T3, cujos painéis apresentaram valor médio superior aos demais.

A partir desses resultados pode-se inferir que o acréscimo de fibras de LAM nos painéis MDF do tratamento T3, em relação aos demais, ocasionou um aumento nos seus valores de MOR.

Geralmente, painéis de uma mesma densidade, manufaturados com madeiras de baixa densidade, apresentam propriedades mecânicas superiores aos manufaturados com madeira de maior densidade, pois possuem maior razão de compactação e maior área de contato entre as fibras (MALONEY, 1977). Isso ocorre devido ao fato de que uma dada massa de fibras, proveniente de madeira de menor densidade, ocupa um maior volume, comparado ao da mesma massa de fibras provenientes de madeira de maior densidade. Quando esses diferentes volumes são prensados para uma mesma espessura final de painel, há uma maior compactação do colchão de fibras de madeira de menor densidade, resultando em maior contato entre fibras e melhora da colagem entre elas (MOSLEMI, 1974a). Este é o caso dos painéis MDF do tratamento T3, cuja razão de compactação foi maior, comparada com a dos painéis dos tratamentos T2 e T4 (*vide* Tabela 11).

Gorrini et al. (2004), estudando painéis MDF de mesma densidade, com 15 mm de espessura, colados com resina à base de ureia-formaldeído, observaram que os painéis manufaturados com madeira de *Eucalyptus nitens* apresentaram valores médios de MOR à flexão estática inferiores aos painéis manufaturado com *Pinus radiata*. Os autores atribuíram esses resultados a menor densidade encontrada para a madeira do *P. radiata*.

Os valores médios de MOR à flexão estática dos painéis MDF do Experimento 2, estão presentes na Tabela 22.

Tabela 22 - Valores médio de módulo de ruptura a flexão estática dos painéis MDF do Experimento 2

Tratamento	Proporção da mistura de fibras	Espessura do painel (mm)	MOR (N/mm ²)
T1	A	12	34,58 a
T5	A	15	31,51 a

Médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente entre si ($p > 0,05$). A=70% de MIX, 15% de TOR e 15% de LAM

A análise de variância dos valores médios de MOR dos painéis MDF do Experimento 2 (ANEXO, TABELA 62), indicou que não houve diferença estatística entre os tratamentos.

A equivalência estatística dos valores médios de MOR dos painéis dos tratamentos T1 e T5 (Tabela 22), produzidos com a mesma proporção de mistura de fibras (A) e massa específica nominal de 800 kg/m^3 , entretanto, com diferentes espessuras (respectivamente, 12 e 15 mm), revela que não houve influência da espessura do painel sobre a variável analisada.

Os valores médios de MOR à flexão estática dos painéis MDF do Experimento 3, estão presentes na Tabela 23.

Tabela 23 - Valores médio de módulo de ruptura a flexão estática dos painéis MDF do Experimento 3

Tratamento	Proporção de mistura de fibras	Espessura do painel (mm)	MOR (N/mm²)
T4	D	15	23,17 b
T6	D	18	32,77 a

Médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente entre si ($p > 0,05$). D=75% de MIX e 25% LAM.

A análise de variância efetuada para o MOR (ANEXO, TABELA 63) demonstrou que houve diferença estatística entre os tratamentos. O valor médio de MOR dos painéis MDF do tratamento T6 se mostrou superior ao dos painéis do tratamento T4.

A diferença estatística entre os tratamentos T4 e T6 (Tabela 23), cujos painéis foram produzidos com a mesma proporção de mistura de fibras (D) e massa específica nominal (700 kg/m^3), porém, com espessuras diferentes (respectivamente, 15 e 18 mm), revela que houve influência significativa da espessura sobre o MOR.

Conforme visto anteriormente, a maior densificação das camadas externas dos painéis MDF contribui para um melhor desempenho das propriedades de flexão estática. Segundo Eleotério (2000) isso pode ser explicado porque no ensaio de flexão as camadas externas são as mais solicitadas, sendo que o ponto de máxima tração localiza-se na face oposta à aplicação da carga e a ruptura ocorre por tração, nesta região. Com base nisso, é possível supor que o maior valor de MOR dos painéis do tratamento T6 em relação aos do T4 pode ter decorrido do maior valor médio da massa específica da camada externa dos painéis do tratamento T6 em relação aos do T4 (*vide* Tabela 14).

A norma NBR 15316-2 (ABNT, 2009) estabelece para painéis MDF de espessura entre 12 e 19 mm, valor mínimo para MOR de 20 N/mm^2 , visando à fabricação de móveis para utilização em condição seca. Observa-se que os painéis MDF de todos os tratamentos (T1 a T6) analisados no presente estudo revelaram valores médios acima do valor mínimo estabelecido pela referida norma.

5.3.7 Módulo de elasticidade à flexão estática

Os valores médios de Módulo de Elasticidade (MOE) à flexão estática dos painéis MDF do Experimento 1, estão presentes na tabela 24.

Tabela 24 - Valores médios para o módulo de elasticidade à flexão estática dos painéis MDF do Experimento 1

Tratamento	Proporção de mistura de fibras	Espessura do painel (mm)	MOE (N/mm²)
T2	B	15	2501 a
T3	C	15	2882 a
T4	D	15	2423 a

Médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente entre si ($p > 0,05$). B=75% de MIX e 25% de TOR; C=60% de MIX e 40% de LAM; D=75% de MIX e 25% LAM.

A análise de variância de MOE dos painéis MDF que compõem o Experimento 1 (ANEXO, TABELA 64), indicou que não houve diferenças significativas entre os tratamentos.

A equivalência estatística dos valores médios de MOE dos painéis dos tratamentos T2, T3 e T4 (Tabela 24), produzidos com a mesma espessura nominal (15 mm) e mesma massa específica nominal (700 kg/cm²), revela que não houve influência das diferentes proporções de mistura de fibras (respectivamente B, C e D) sobre a variável analisada.

Os valores médios de MOE à flexão estática dos painéis MDF do Experimento 2, estão presentes na Tabela 25.

Tabela 25 - Valores médios para o módulo de elasticidade à flexão estática dos painéis MDF do Experimento 2

Tratamento	Proporção de mistura de fibras	Espessura do painel (mm)	MOE (N/mm²)
T1	A	12	3237 a
T5	A	15	3465 a

Médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente entre si ($p > 0,05$). A=70% de MIX, 15% de TOR e 15% de LAM

A análise de variância de MOE dos painéis MDF que compõem o Experimento 2 (ANEXO, TABELA 65), indicou que não houve diferenças significativas entre os tratamentos.

A equivalência estatística dos valores médios de MOE dos painéis dos tratamentos T1 e T5 (Tabela 25), produzidos com a mesma proporção de mistura de fibras (A) e massa específica nominal (800 kg/cm²), revela que não houve influência das diferentes espessuras (respectivamente, 12 e 15 mm) sobre a variável analisada.

Os valores médios de MOE à flexão estática dos painéis MDF do Experimento 3, estão presentes na Tabela 26.

Tabela 26 - Valores médios para o módulo de elasticidade à flexão estática dos painéis MDF do Experimento 3

Tratamento	Proporção de mistura de fibras	Espessura do painel (mm)	MOE (N/mm²)
T4	D	15	2423 b
T6	D	18	2900 a

Médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente entre si ($p > 0,05$). D=75% de MIX e 25% LAM.

Por meio da análise de variância efetuada para o MOE (ANEXO, TABELA 66), verificou-se que o valor médio dos painéis MDF do tratamento T6 foi superior ao dos painéis do tratamento T4.

A diferença estatística entre os tratamentos T4 e T6 (Tabela 26), cujos painéis foram produzidos com a mesma proporção de mistura de fibras (D) e massa específica nominal (700 kg/m³), porém, com espessuras diferentes (respectivamente, 15 e 18 mm), revela que houve influência significativa da espessura sobre a variável MOE.

A análise do MOE dos painéis do Experimento 3 (Tabela 26) seguiu o mesmo comportamento estatístico da massa específica encontrada para sua camada externa (*vide* Tabela 14), evidenciando uma relação positiva entre estas duas variáveis, conforme verificado anteriormente para o MOR.

Krzysik et al (2001) e Hunt et al. (2008), observaram em seus estudos que a espessura e os valores de MOE foram diretamente proporcionais, ou seja, os valores de MOE aumentaram com o aumento da espessura do painel MDF.

A norma NBR 15316-2 (ABNT, 2009) estabelece, para painéis MDF de espessura entre 12 e 19 mm, valor mínimo para MOE de 2200 N/mm². Observa-se que os painéis de todos os tratamentos (T1 a T6) obtiveram valores médios acima do valor mínimo estabelecido pela norma para fabricação de móveis com uso em condição seca.

5.3.8 Ligação interna

Os valores médios de Ligação Interna (LI) dos painéis MDF do Experimento 1, estão presentes na Tabela 27.

Tabela 27 - Valores médios de ligação interna dos painéis MDF do Experimento 1

Tratamento	Proporção da mistura de fibras	Espessura do painel (mm)	LI (N/mm²)
T2	B	15	0,47 a
T3	C	15	0,38 a
T4	D	15	0,33 a

Médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente entre si ($p > 0,05$). B=75% de MIX e 25% de TOR; C=60% de MIX e 40% de LAM; D=75% de MIX e 25% LAM.

A análise de variância para a variável LI dos painéis MDF realizada para o Experimento 1 (ANEXO, TABELA 67), indicou que não houve diferença estatística entre os tratamentos.

A equivalência estatística dos valores médios de LI para os tratamentos T2, T3 e T4, cujos painéis MDF, foram produzidos com a mesma espessura nominal (15 mm) e massa específica nominal (700 kg/m³), indicou que não houve diferença estatística entre os tratamentos, ou seja, não houve influência das diferentes proporções de fibras (respectivamente B, C e D) sobre a variável.

Os valores médios de LI dos painéis MDF do Experimento 2, estão presentes na Tabela 28.

Tabela 28 - Valores médios de ligação interna dos painéis MDF do Experimento 2

Tratamento	Proporção de mistura de fibras	Espessura do painel (mm)	LI (N/mm²)
T1	A	12	0,48 a
T5	A	15	0,32 b

Médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente entre si ($p > 0,05$). A=70% de MIX, 15% de TOR e 15% de LAM.

Por meio da análise de variância efetuada para LI (ANEXO, TABELA 68), verificou-se que os valores médios dos painéis MDF dos tratamentos T1 e T5 diferiram estatisticamente entre si.

A diferença estatística dos valores de LI dos painéis dos tratamentos T1 e T5 (Tabela 28), produzidos com a mesma proporção de mistura de fibras (A) e mesma massa específica

nominal (800 kg/m^3), revelou que houve influência das diferentes espessuras (respectivamente, 12 e 15 mm) sobre a variável analisada.

Nota-se na Tabela 28 que os painéis de menor espessura (12 mm) apresentaram valor médio de LI superior ao dos painéis de maior espessura (15 mm). Este comportamento também foi observado por Krzysik et al. (2001), os quais obtiveram valores médios de LI para painéis de 6 mm, 12 mm e 19 mm de espessura equivalentes a $1,12 \text{ N/mm}^2$, $0,87 \text{ N/mm}^2$ e $0,66 \text{ N/mm}^2$, respectivamente, verificando que o aumento da espessura promoveu a redução dos valores de LI.

Os valores médios de LI dos painéis MDF do Experimento 3, estão presentes na Tabela 29.

Tabela 29 - Valores médios de ligação interna dos painéis MDF do Experimento 3

Tratamento	Proporção de mistura de fibras	Espessura do painel (mm)	LI (N/mm^2)
T4	D	15	0,33 a
T6	D	18	0,31 a

Médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente entre si ($p > 0,05$). D=75% de MIX e 25% LAM.

A análise de variância para a variável LI realizada para o Experimento 3 (ANEXO, TABELA 69), indicou que não houve diferença estatística entre os tratamentos.

A equivalência estatística dos valores de LI dos painéis dos tratamentos T4 e T6 (Tabela 29), os quais foram produzidos com a mesma proporção de mistura de fibras (D) e mesma massa específica nominal (700 kg/cm^3), porém, com espessuras diferentes (respectivamente, 15 e 18 mm), revelou que não houve efeito significativo da espessura sobre a variável analisada.

De acordo com Kelly (1977), mesmo ocorrendo uma cura eficiente do adesivo, os painéis ao serem submetidos ao ensaio de ligação interna (LI) tendem a romper-se na camada central do corpo-de-prova, isto porque, nesta mesma camada, a massa específica do painel é mais baixa em relação à das camadas externas e, geralmente, menos resistente. Wong et al. (2000), estudando o efeito do ciclo de prensagem e do teor de umidade do colchão de fibras sobre as propriedades de painéis MDF, verificou que 90% dos corpos-de-prova romperam na camada central, e atribuíram como responsável por esse resultado a baixa massa específica da mesma camada.

Conforme visto no Experimento 2 (Tabela 13), os painéis do tratamento T1 apresentaram valor médio de massa específica na camada central estatisticamente equivalente

ao dos painéis do tratamento T5. Sendo assim, seria de se esperar que suas resistências à ligação interna também fossem equivalentes, mas, não foram (Tabela 28). Por outro lado, no Experimento 3 (Tabela 14), o valor médio da massa específica na camada central dos painéis do tratamento T4 foi superior ao dos painéis do tratamento T6. Com base nesse resultado, seria esperável que a resistência da ligação interna dos painéis do tratamento T4 viesse a ser superior à dos painéis do tratamento T6, e não equivalente como demonstrado na Tabela 29.

A razão pela qual não ocorreram as interações que poderiam ser esperadas entre a massa específica da camada central e a ligação interna dos painéis deve ser mais bem compreendida, sendo necessários mais estudos relacionados.

Belini et al. (2008b), estudando o efeito de diferentes condições de desfibramento sobre as propriedades mecânicas de painéis MDF com massa específica nominal de 700 kg/m^3 , utilizando madeira de *Eucalyptus grandis*, encontraram valores médios para ligação interna variando entre 0,78 e $1,01 \text{ N/mm}^2$.

Pugel et al. (1990a), estudando as propriedades mecânicas de MDF produzidos com madeira *Pinus taeda*, encontraram valores médios para ligação interna variando entre 0,69 e $1,39 \text{ N/mm}^2$.

A norma NBR 15316-2 (ABNT, 2009) estabelece valores mínimos de LI, para painéis MDF de espessura entre 12 e 19 mm, de $0,55 \text{ N/mm}^2$, visando à produção de móveis para a utilização em condições secas. Observa-se que os valores médios de LI dos painéis MDF de todos os tratamentos (T1 a T6) foram inferiores ao valor mínimo estabelecido pela norma, bem como foram inferiores aos encontrados na literatura. Entretanto, segundo a mesma norma em referência, painéis MDF com valores de ligação interna acima de $0,30 \text{ N/mm}^2$ podem ser utilizadas como forros e paredes. Sendo assim, os painéis MDF do presente estudo, cujos valores médios de LI variaram entre $0,31 \text{ N/mm}^2$ a $0,48 \text{ N/mm}^2$, poderiam ser destinados a esses fins.

Uma possível explicação para o baixo desempenho da ligação interna dos painéis MDF do presente estudo pode estar relacionada com o perfil de densidade vertical (semelhante à letra “U”), já comentado anteriormente (*vide* item 5.3.3).

Outra possível explicação pode estar relacionada com a presença de feixes de fibras encontrados na camada central dos painéis. Tais feixes puderam ser observados (Figura 10) após o rompimento dos corpos-de-prova mediante aos ensaios de LI.

Figura 10 – Feixes de fibras presentes na camada central de um corpo-de-prova de um painel MDF rompido por tração perpendicular ao plano após o ensaio de ligação interna

Os feixes de fibras, pelo fato de serem espessos, podem ter absorvido apenas superficialmente a resina, estando esta ausente ou em quantidade insuficiente nas suas camadas mais internas, prejudicando a resistência da colagem.

5.3.9 Resistência ao arranque de parafuso no topo

Para a realização dos ensaios de resistência ao arranque de parafuso no topo (APT), a norma NBR 15316-2 (ABNT, 2009) determina que a espessura mínima do painel deve ser de 14 mm. Por este motivo, o ensaio de APT não foi realizado nos painéis de 12 mm (tratamento T1) e, conseqüentemente, não pôde ser efetuada a análise de variância para o Experimento 2.

Os valores médios de APT dos painéis MDF do Experimento 1, estão presentes na tabela 30.

Tabela 30 - Valores médios de resistência ao arranque de parafuso no topo dos painéis MDF do Experimento 1

Tratamento	Proporção de mistura de fibras	Espessura do painel (mm)	APT (N)
T2	B	15	833,57 a
T3	C	15	681,56 b
T4	D	15	709,35 ab

Médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente entre si ($p > 0,05$). B=75% de MIX e 25% de TOR; C=60% de MIX e 40% de LAM; D=75% de MIX e 25% LAM.

Por meio do teste de *Tukey* aplicado após a análise de variância efetuada para a variável APT (ANEXO, TABELA 70), verificou-se que o valor médio dos painéis MDF dos tratamentos T2 e T4, bem como o dos painéis dos tratamentos T3 e T4, não diferiram

estatisticamente. O valor médio de APT dos painéis do tratamento T2 diferiu estatisticamente e foi superior ao encontrado para os painéis do tratamento T3. Este último caso revela que houve influência das proporções de fibras B e C (respectivamente) sobre o valor da APT.

Para a realização do ensaio de APT, o parafuso é fixado no topo e ao centro da espessura do corpo-de-prova, ou seja, justamente na camada central do painel MDF. De acordo com Kelly (1977), o arranque de parafuso é influenciado diretamente pela densidade da camada central, ou seja, a resistência ao arranque aumenta com o aumento da densidade da camada central do painel. De acordo com Wang (2007), parafusos fixados em camada de baixa massa específica tendem a apresentar menor resistência ao arranque do que aqueles fixados em camada de alta massa específica.

Como visto na Tabela 12, o valor médio de massa específica na camada central dos painéis do tratamento T2 foi estatisticamente diferente e superior ao encontrado para os painéis do tratamento T3, sendo isso uma possível explicação para o maior valor médio de APT dos painéis do tratamento T2 em relação aos do tratamento T3.

Os valores médios de APT dos painéis MDF, para os Experimentos 3, estão presente na tabela 31.

Tabela 31 - Valores médios de resistência ao arranque de parafuso no topo dos painéis MDF do Experimento 3

Tratamento	Proporção de mistura de fibras	Espessura do painel (mm)	APT (N)
T4	D	15	709,35 a
T6	D	18	640,70 b

Médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente entre si ($p > 0,05$). D=75% de MIX e 25% LAM.

Por meio da análise de variância efetuada para a variável APT (ANEXO, TABELA 71), verificou-se que os tratamentos T4 e T6 diferiram estatisticamente entre si. O valor médio de APT dos painéis do tratamento T4 foi superior ao dos painéis do tratamento T6, indicando que houve efeito da espessura do painel sobre a referida variável.

De acordo com a Tabela 14, os painéis do tratamento T4 (15 mm) apresentaram valor médio de massa específica na camada central estatisticamente diferente e superior ao dos painéis do tratamento T6 (18 mm). Sendo assim, confirmou-se o esperado, ou seja, que os painéis do tratamento T4 apresentassem, também, valor médio de APT superior ao dos painéis do tratamento T6.

Barbosa (2010), avaliando a qualidade de painéis MDF de *Pinus* spp e *Eucalyptus* spp, com densidade na faixa de 650 kg/m³ a 800 kg/m³ e espessura nominal de 18 mm, encontrou valores médios para APT entre 556,53 N e 705,74 N.

Ferreira (2010), manufacturando painéis MDF com densidade nominal de 700 kg/m³, a partir da madeira de *Pinus taeda*, encontrou valores médios de APT entre 579 e 827 N.

A norma NBR 15316-2 (ABNT, 2009) não estabelece valores mínimos para APT, entretanto, os valores médios de APT encontrados para os painéis do presente estudo (640,7 N a 833,57 N) são compatíveis com os encontrados na literatura citada (556,53 N a 827,0 N).

5.3.10 Resistência ao arranque de parafuso na face

Os valores médios de resistência ao arranque de parafuso na face (APF) dos painéis MDF do Experimento 1, estão presentes na Tabela 32.

Tabela 32 - Valores médios de resistência ao arranque de parafuso na face dos painéis MDF do Experimento 1

Tratamento	Proporção de misturas de fibras	Espessura do painel (mm)	APF (N)
T2	B	15	1170,26 a
T3	C	15	1003,55 b
T4	D	15	1005,18 b

Médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente entre si ($p > 0,05$). B=75% de MIX e 25% de TOR; C=60% de MIX e 40% de LAM; D=75% de MIX e 25% LAM.

Por meio do teste de *Tukey*, aplicado após a análise de variância efetuada para o APF (ANEXO, TABELA 72), verificou-se que os valores médios de resistência ao arranque de parafuso na face dos painéis MDF dos tratamentos T3 e T4 não diferiram estatisticamente entre si, entretanto, ambos diferiram do encontrado para os painéis do tratamento T2, o qual apresentou valor médio superior aos demais. Esse resultado indica que houve influência da proporção de mistura de fibras sobre a variável analisada.

Uma possível explicação para o resultado obtido pode ter origem na operação de desfibramento dos cavacos. Por terem sido submetidos à mesma condição de desfibramento (*vide* item 4.2.1), os cavacos provenientes de TOR (obtidos de toras), possivelmente, por serem mais espessos que os cavacos provenientes de LAM (obtidos de lâminas), geraram maior quantidade de feixes de fibras. Esses feixes teriam favorecido a resistência ao arranque de parafuso na face dos painéis MDF do tratamento T2.

De acordo com Beline (2007) e Hua et al. (2012), cavacos de maior espessura, por não serem aquecidos homogeneamente e completamente, podem apresentar deficiência no processo de plasticização da lignina quando comparados aos cavacos de menor espessura, gerando maiores quantidades de feixes de fibras. Belini (2007) atribuiu à presença de feixes

de fibras e de frações mais grosseiras do lenho o aumento de resistência ao arrancamento de parafuso na face dos corpos de prova de painéis MDF, afirmando ser esta característica interessante, no que concerne a aplicabilidade final do produto.

Os valores médios de APF dos painéis MDF do Experimento 2, estão presentes na Tabela 33.

Tabela 33 - Valores médios de resistência ao arranque de parafuso na face dos painéis MDF do Experimento 2

Tratamento	Proporção de mistura de fibras	Espessura do painel (mm)	APF (N)
T1	A	12	1162,09 a
T5	A	15	870,83 b

Médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente entre si ($p > 0,05$). D=75% de MIX e 25% LAM.

De acordo com a análise de variância efetuada para o APF (ANEXO, TABELA 72), verificou-se que houve diferença estatisticamente significativa entre os tratamentos. O valor médio de APF dos painéis do tratamento T1 foi superior ao dos painéis do tratamento T5, indicando que houve influencia da espessura sobre a variável analisada.

Destaca-se que esse resultado não corresponde ao que poderia ser esperado. Conforme já observado na Tabela 13, os painéis MDF dos tratamentos T1 e T5 apresentaram valores médios de massa específica estatisticamente equivalente, tanto na camada externa como na camada central. Sendo assim, o esperado era que os painéis desses tratamentos, também, apresentassem valores médios de APF equivalentes, mas, isso não ocorreu. O motivo pelo qual isso aconteceu deve ser mais bem esclarecido, sendo necessários novos estudos para tanto.

Os valores médios de APF dos painéis MDF do Experimento 3, estão presentes na Tabela 34.

Tabela 34 - Valores médios de resistência ao arranque de parafuso na face dos painéis MDF do Experimento 3

Tratamento	Proporção de mistura de fibras	Espessura do painel (mm)	APF (N)
T4	D	15	1005,18 a
T6	D	18	820,49 b

Médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente entre si ($p > 0,05$)

Por meio da análise de variância (ANEXO, TABELA 73) efetuada para variável APF, verificou-se que houve diferença estatisticamente significativa entre os tratamentos. O valor médio de APF dos painéis MDF do tratamento T4 se mostrou superior ao dos painéis do

tratamento T6 (Tabela 34), revelando que houve influência significativa da espessura sobre a variável analisada.

A norma NBR 15316 (ABNT, 2009) determina que na preparação prévia ao ensaio de APF o parafuso penetre 15 mm de profundidade no corpo-de-prova, para depois ser arrancado do painel mediante ao ensaio. Considerando que os painéis do tratamento T4 possuíam 15 mm de espessura, observa-se que o parafuso colocado no corpo-de-prova atravessou praticamente toda a sua extensão transversal, ou seja, de uma face à outra, abrangendo as camadas externa de uma face, central, e externa da outra face. Por outro lado, para os painéis do tratamento T6 (18 mm de espessura) o parafuso atravessou somente a camada externa de uma das suas faces e atingiu a camada interna, na qual permaneceu ancorado. Presume-se que no ensaio de arranque, pelo fato do parafuso ter percorrido face a face os painéis do tratamento T4, a resistência oferecida foi maior em comparação a dos painéis do tratamento T6, explicando-se assim o resultado apresentado na Tabela 34. Adicionalmente, pode ter contribuído para esse resultado o fato dos painéis do tratamento T4 terem apresentado valor médio de massa específica da camada central superior ao dos painéis do tratamento T6 (vide Tabela 14).

Belini e Tomazello Filho (2010), avaliando as propriedades de painéis MDF de *Eucaliptus grandis*, encontraram valores médios para APF de 1206,1 N a 1235,6 N.

Barbosa (2010), avaliando a qualidade dos painéis MDF comercializados na região de Pelotas-RS, obteve valores médios para APF de 769,50 N a 946,18 N.

Ferreira (2010), estudando as propriedades mecânicas de painéis MDF de *Pinus taeda*, encontrou valores médios para APF de 786,1 N a 1024,3 N.

A norma NBR 15316-2 (ABNT, 2009), da mesma maneira que para APT, também, não determina valor mínimo para a propriedade de APF. Contudo, os valores encontrados para os painéis MDF do presente estudo (820,49 N a 1170,26 N) são compatíveis com os encontrados na literatura.

6 CONCLUSÕES

A partir dos resultados obtidos e discutidos no presente estudo, foi possível extrair as seguintes conclusões:

Os cavacos de madeira de *Schizolobium amazonicum*, tanto os obtidos a partir de toras (TOR) quanto de lâminas (LAM), apresentaram densidade básica equivalente (respectivamente, 300 kg/m³ e 290 kg/m³) e compatível com os dados de literatura. A densidade básica dos cavacos provenientes dos resíduos madeireiros de espécies nativas da Amazônia (MIX), igual a 650 kg/m³, foi superior à dos cavacos de TOR e de LAM. Os valores da densidade básica das misturas de cavacos das madeiras nas proporções A (70% de MIX, 15% de TOR e 15% de LAM), B (75% de MIX e 25% de TOR), C (60% de MIX e 40% de LAM) e D (75% de MIX e 25% LAM), variaram entre 506 kg/m³ e 563 kg/m³ e foram intermediários aos dos cavacos das madeiras isoladas;

As fibras inteiras obtidas dos cavacos de madeira de TOR e de LAM mostraram-se similares, e caracterizaram-se pelo menor comprimento e espessura da parede celular, e maior largura e diâmetro do lume, quando comparadas às fibras obtidas dos cavacos de madeira de MIX;

A operação de desfibramento industrial dos cavacos ocasionou a redução dos valores de comprimento das fibras, quando comparados aos obtidos das fibras inteiras dos cavacos das madeiras de TOR, LAM e MIX. De modo geral, as condições de desfibramento não causaram danos severos ao comprimento das fibras, as quais foram quebradas com maior frequência em suas extremidades, demonstrando boa flexibilidade;

Os perfis de densidade dos painéis MDF apresentaram-se em forma semelhante à letra “U” e revelaram alta densificação nas camadas externas e baixa densificação na camada central;

Não houve efeito significativo das proporções de misturas de fibras das madeiras (B, C e D), utilizadas na manufatura dos painéis MDF do Experimento 1 (massa específica e espessura nominais de 700 kg/m³ e 15mm) sobre os seus valores de massa específica média, AA2h, AA24h, IE2h, IE24h, MOE à flexão estática e LI. Entretanto, houve efeito significativo da variável em referência sobre o perfil de densidade, MOR à flexão estática, APT e APF dos painéis. Os painéis MDF manufaturados com a mistura de fibras das madeiras na proporção B apresentaram melhor desempenho nas propriedades de APT e APF, e os painéis na proporção C desempenho superior no MOR;

Não houve efeito significativo das espessuras (12 mm e 15 mm) dos painéis MDF do Experimento 2 (mistura de fibras na proporção A e massa específica nominal de 800 kg/m³) sobre os seus valores de massa específica média, perfil de densidade, IE2h, MOR e MOE à flexão estática. Porém, houve efeito significativo das espessuras dos painéis sobre AA2h, AA24h, IE24h, LI e APF. Os painéis de 12 mm mostraram melhor desempenho nas propriedades de LI e APF, e os painéis de 15 mm melhor desempenho em AA2h, AA24h e IE24H, porque absorveram menor quantidade de água e incharam menos;

Não houve efeito significativo das espessuras (15 mm e 18 mm) dos painéis MDF do Experimento 3 (mistura de fibras na proporção D e massa específica nominal de 700 kg/m³) sobre os seus valores de massa específica média, AA2h, AA 24h e LI. Contudo, para o perfil de densidade e demais variáveis de resposta, diferenças significativas foram encontradas. Os painéis MDF de 18 mm exibiram melhor desempenho nas propriedades de IE2h, IE24h, MOR e MOE à flexão estática. Os painéis de 15 mm tiveram melhor desempenho nas propriedades de APT e APF.

Resguardadas as especificidades dos painéis MDF dos Experimentos 2 e 3, notou-se o mesmo padrão de resposta com a variação da espessura em ambos os casos, ou seja, o aumento da espessura dos painéis resultou em redução significativa de IE24h e APF;

Todos os painéis MDF avaliados no presente estudo atenderam aos valores requeridos pela norma NBR 15316-2 (ABNT, 2009b), para fabricação de móveis a serem utilizados em condições secas, com exceção dos valores de LI que se mostraram aquém. Esse resultado evidencia a necessidade de ações, sobre o processo produtivo dos painéis, para melhoria dos valores da referida propriedade. Entre outras possibilidades experimentais, o aumento do tempo de fechamento da prensa e, ou, do teor de adesivo na camada interna são recomendáveis.

REFERÊNCIAS

- AI SYAH, H.A.; PARIDAH, M.T.; SAHRI, M.H.; ASTIMAR, A.A.; ANWAR, U.M.K. Influence of thermal mechanical pulping production parameters on properties of medium density fiberboard made from kenaf bast. **Journal of Applied Sciences**, Faisalabad, v. 12, n. 6, p. 575-580, 2012.
- AKBULUT, T.; AYRILMIS, N. Effect of compression wood on surface roughness and surface absorption of medium density fiberboard. **Silva Fennica**, Helsinki, v. 40, n. 1, p. 161-167, 2006.
- AKBULUT, T.; KOÇ, E. The effects of the panel density, panel temperature and cutter sharpness during edge machining on the roughness of the surface and profiled areas of medium density fiberboard. **Forest Product Journal**, Madison, v. 54, n. 12, p. 67-70, 2004.
- AKGÜL, M.; ÇAMLİBEL, O. Manufacture of medium density fiberboard (MDF) panels from rhododendron (*R. ponticum* L.). **Building and Environment**, Oxford, v. 43, n. 4, p. 438-443, 2008.
- AKGÜL, M.; TOZLUOĞLU, A. Utilizing peanut husk (*Arachis hypogaea* L.) in the manufacture of medium-density fiberboards. **Bioresource Technology**, Amsterdam, v. 99, n. 13, p. 5590-5594, 2008.
- AKGUL, M.; ÇOPUR, Y; GULER, C.; TOZLUOĞLU, A.; BUYUKSARI, U. Medium density fiberboard from *Quercus robur*. **Journal of Applied Sciences**, Faisalabad, v. 7, n. 7, p. 1085-1087, 2007.
- ALMEIDA, V.C. **Efeito da adição de carga e extensor nas propriedades do adesivo ureia-formaldeído e dos compensados de pinus e paricá**. 2009. 75 p. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2009.
- ALPAR, T.; FÁCZÁN, T.; RÁCZ, I.; KÁTOLI, G. MDF/HDF production from plantation wood species. **DRVNA Industrija**, Zagreb, v. 61, n. 3, p. 183-191, 2010.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE FLORESTA PLANTADA (ABRAF). **Anuário estatístico 2013**. Brasília: 2013. 146 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TECNICAS. **NBR 15316-1**: Chapas de fibra de média densidade - Terminologias. Rio de Janeiro: ABNT, 2009. 6 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TECNICAS. **NBR 15316-2**: Chapas de fibras de média densidade - Requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2009. 48 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TECNICAS. **NBR 15316-3**: Chapas de fibras de média densidade – Métodos de ensaios. Rio de Janeiro: ABNT, 2009. 48 p.
- AYRILMIS, N. Effect of panel density on dimensional stability of medium and high density fiberboards. **Journal of Materials Science**, Norwell, v. 42, n. 20, p. 8551-8557, 2007.

BARBOSA, A.M. **Avaliação da qualidade dos painéis MDF comercializados na região de Pelotas**. 2010. 68 p. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso) - Universidade federal de Pelotas, Pelotas, 2010.

BARRICHELO, L.E.G. **Estudo das características físicas, anatômicas e químicas da madeira de *Pinus caribaea* Mor. var. *hondurensis* Barr. e Golf. para a produção de celulose kraft**. 1979. 167 p. Tese (Livre-Docência) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1979.

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

BELINI, U.L. **Caracterização tecnológica de painéis de fibras de madeira de eucalipto, *Eucalyptus grandis*, e de partículas do bagaço do colmo da cana de açúcar, *Saccharum sp.*** 2012. 168 p. Tese (Doutorado em Recursos Florestais) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2012.

BELINI, U.L.; TOMAZELLO FILHO, M. Avaliação tecnológica de painéis MDF de madeira de *Eucalyptus grandis* confeccionados em laboratório e em linha de produção industrial. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 20, n. 3, p. 493-500, 2010.

BELINI, U.L.; TOMAZELLO FILHO, M.; CHAGAS, M.P.; DIAS, C.T.S. Caracterização da estrutura anatômica, densidade básica e morfologia de cavacos da madeira de *Eucalyptus grandis* para a produção de painéis MDF. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 32, n. 4, p. 707-713, 2008a.

BELINI, U.L.; TOMAZELLO FILHO, M.; CHAGAS, M.P.; DIAS, C.T. Efeito do desfibramento da madeira de *Eucalyptus grandis* na morfologia das fibras e propriedades de painéis MDF. **Cerne**, Lavras, v. 14, n. 3, p. 227-233, 2008b.

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.

BIANCHE, J.J. **Propriedades de aglomerados fabricados com partículas de eucalipto (*Eucalyptus urophylla*), paricá (*Schizolobium amazonicum*) e vassoura (*Sida spp.*)**. 2009. 81 p. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2009.

BIAZUS, A.; HORA, A.B.; LEITE, B.G.P. **Panorama de mercado: painéis de madeira**. Disponível em <http://www.abipa.org.br/Panorama_do_mercado_de_paineis_de_madeira.pdf>. Acesso em: 13 fev. 2014.

BOEHME, C. Significance of the density profile for MDF. **European Journal of Wood and Wood Products**, Berlin, v. 50, n. 1, p. 18-24, 1992.

BRITO, E.O. Estimativa da produção de resíduos na indústria brasileira de serraria e laminação de madeira. **Floresta e Ambiente**, Seropédica, v. 2, n. 1, p. 83-84, 1995.

BURGER, L.M.; RICHTER, H.G. **Anatomia da madeira**. 1.ed. São Paulo: Livraria Nobel, 1991. 154 p.

CAI, Z. MUEHL, J.H.; WINANDY, J.E. Effects of panel density and mat moisture content on processing medium density fiberboard. **Forest Products Journal**, Madison, v. 56, n. 10, p. 20-25, 2006a.

CAI, Z.; MUEHL, J.H.; WINANDY, J.E. Effects of pressing schedule on formation of vertical density profile for MDF panels. INTERNATIONAL WOOD COMPOSITES SYMPOSIUM, 40, 2006, Washington. **Proceeding...** Washington: USDA Forest Service, 2006b. 11p.

CAMPOS, C.I.; LAHR, F.A.R. Estudos comparativos dos resultados de ensaio de tração perpendicular para MDF produzidos em Laboratório com fibras de Pinus e de Eucalipto utilizando ureia-formaldeído. **Revista Matéria**, Rio de Janeiro, v. 9, n. 1, p. 29-40, 2004.

CARLL, C.; WIEDENHOEFT, A.C. Moisture-related properties of wood and the effects of moisture on wood and wood products. In: HEINZ, T.; MARK, B. **Moisture control in buildings: The key factor in mold prevention**. Madison: USDA Forest Service, 2009. chap. 4, p. 54-79.

CARVALHO, L.M.H.; COSTA, M.R.N.; COSTA, C.A.V. A global model for the hot-pressing of MDF. **Wood Science and Technology**, New York, v. 37, n. 3-4, p. 241-258, p. 241-258, 2003.

CARVALHO, P. E. R. **Espécies florestais brasileiras: recomendações silviculturais, potencialidade e uso da madeira**. 1 ed. Curitiba: EMBRAPA/CNPQ, 1994. 640 p.

CARVALHO, P. E. R. **Paricá: *Schizolobium amazonicum***. Colombo: Embrapa Florestas, 2007, 8 p. (Circular Técnica, 142).

CASSILHA, A.C.; PODLASEK, C.L.; CASAGRANDE JÚNIOR, E.F.; SILVA, M.C.; MENGATTO, S.N.F. Indústria moveleira e resíduos sólidos: considerações para o equilíbrio ambiental. **Revista Educação e Tecnologia**, Curitiba, v. 8, n. 1, 13 p, 2004.

CERQUEIRA, P.H.A.; VIEIRA, G.C.; BARBERENA, I.M.; MELO, L.C.; FREITAS, L.C. Análise dos resíduos madeireiros gerados pelas serrarias do Município de Eunápolis-BA. **Floresta e Ambiente**, Seropédica, v. 19, n. 4, p. 506-510, 2012.

CIFLORESTAS. **O uso do paricá na indústria madeireira**. Disponível em: <http://www.ciflorestas.com.br/conteúdo.php?tit=uso_do_parica_na_industria_madeira&id=8762>. Acesso em: 11 mar. 2013.

COLLI, A.; VITAL, B.R.; CARNEIRO, A.C.O.; SILVA, J.C.; CARVALHO, A.M.M.L.; LUCIA, R.M.D. Propriedades de chapas fabricadas com partículas de madeira de paricá (*Schyzolobium amazonicum* Huber ex. Ducke) e fibras de coco (*Cocos nucifera* L.). **Revista Árvore**, Viçosa, v. 34, n. 2, p. 333-338, 2010.

CYR, P.L.; RIEDL, B.; WANG, X.M.; SHALER, S. Urea-melamine-formaldehyde (UMF) resin penetration in medium-density fiberboard (MDF) wood fibers. **Journal of Adhesion Science and Technology**, Utrecht, v. 20, n. 8, p. 787-801, 2006.

ÇÖPUR, Y.; GÜLER, C.; TASÇIOĞLU, C.; TOZLUOĞLU, A. Incorporation of hazelnut shell and husk in MDF production. **Bioresource Technology**, Amsterdam, v. 99, n. 15, p. 7402-7406, 2008.

DEL MENEZZI, C.H.S. **Estabilização dimensional por meio do tratamento térmico e seus efeitos sobre as propriedades de painéis de partículas orientadas (OSB)**. 2004. 226p. Tese (Doutorado em Ciências Florestais) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2004.

DÍAS, L.; VELÁSQUEZ, J.; QUINTANA, G. Evaluación del efecto del espesor en las propiedades mecánicas de tableros sin adhesivos de bagazo de caña de azúcar. In; INTERNATIONAL PULP AND PAPER CONGRESS, 45., 2012, São Paulo, **Proceedings...** São Paulo: ABTCP, 2012. 7 p.

ELEOTÉRIO, J. **Propriedades físicas e mecânicas de painéis MDF de diferentes densidades e teores de resina**. 2000. 121 p. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia da Madeira) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2000.

EMERSON, D.W.V. **Métodos de análise de formaldeído e otimização da reação de Hantzsch**. 2010. 77 p. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso de Engenharia Industrial Madeireira) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2010.

EROĞLU, H.; İSTEK, A.; USTA, M. Medium density fiberboard (MDF) manufacturing from wheat straw (*Triticum aestivum* L.) and straw wood mixture. **International Journal of Engineering Sciences**, New York, v. 7, n. 2, 2001.

FEITOSA, B.C. Aproveitamento dos resíduos de madeira no Pará. **Revista da Madeira**. jun. 2008. Disponível em <http://www.remade.com.br/br/revistadamadeira_materia.php?num=1274&subject=Res%EF%BF%BDduos&title=Aproveitamento+dos+res%EF%BF%BDduos+de+madeira+no+Par%E%BF%BD>. Acesso em: 03 jun. 2014.

FERNANDO, D.; MUHIC, D.; ENGSTRAND, P.; DANIEL, G. Fundamental understanding of pulp property development under different thermomechanical pulp refining conditions as observed by a new Simons' staining method and SEM observation of ultrastructure of fibre surfaces. **Holzforschung**, Berlin, v. 65, n. 6, p. 777-786, 2011.

FERREIRA, E.S. **Propriedade físico-mecânicas de painéis de fibras de média densidade (MDF) produzidos com resinas convencionais e modificadas com tanino de Acácia Negra**. 2010. 212 p. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2010.

FLORSHEIM, S.M.B.; TOMAZELLO FILHO, M. Variação da densidade básica de aroeira *Myracrodruon urundeuva* F.F. & M.F. Allemão (Anacardiaceae). **Revista do Instituto Florestal**, São Paulo, v. 10, n.1, p. 53-61, 1998.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION-FAO. **Fibreboard and Particleboard**. Rome: FAO, 1953, 73p.

FONTES, P.J.P. **Autossuficiência energética em serraria**. 1994. 140 p. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 1994.

FOREST PRODUCTS LABORATORY. **Wood Handbook**: wood as engineering material. Madison: U.S. Department Agriculture, U.S. Forest Service, Forest Products Laboratory, 2010. 508 p.

FORZANI, R. R. **Caracterização mecânica e anatômica da madeira *Shizolobium amazonicum* (Huber) Ducke (paricá)**. 2007. 63 p. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Florestal) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2007.

FRANKLIN, G.L. Preparation of the thin sections of synthetic resins and wood-resin composites, and a new macerating method for wood. **Nature**, Londres, v. 155, n. 1, p. 51, 1945.

GANEV, S.; CLOUTIER, A.; BEAUREGARD, R.; GENDRON, G. Linear expansion and thickness swell of MDF as a function of panel density and sorption state. **Wood and Fiber Science**, Madison, v. 37, n. 2, p. 327–336, 2005.

GAO, Z.; WANG, X.M.W.; WAN, H.; BRUNETTE, G. Binderless panels made with black spruce bark. **BioResources**, Raleigh, v. 6, n. 4, p. 3960-3972, 2011.

GILLAH, P.R.; IRLE, M.A.; AMARTEY, S.A. Development and production of laboratory scale novel MDF panels from composite and nonwoven mattresses of sisal and wood fibers mixtures. **European Journal of Wood and Wood Products**, Berlin, v. 58, n. 5, p. 324-330, 2000.

GOMES, J.I.; SAMPAIO, S.S. **Aproveitamento de resíduos de madeira em três empresas madeireiras do Estado do Pará**. 2004. Belém: Embrapa Amazônia Oriental, 2004. 5 p. (Comunicado técnico, 102).

GORRINI, B.; POBLETE, H.; HERNANDEZ, G.; DUNN, F. Tableros de partículas y MDF de *Eucalyptus nitens*: Ensayos a escala industrial. **Bosque**, Valdivia, v. 25, n. 3, p. 89-97, 2004.

HALVARSSON, S. **Manufacture of straw MDF and fibreboards**. 2010. 82 p. Thesis (Doctor of Technology) - Mid Sweden University, Sundsvall, 2010.

HALVARSSON, S.; EDLUND, H.; NORGREN, M. Properties of medium-density fibreboard (MDF) based on wheat straw and melamine modified urea formaldehyde (UMF) resin. **Industrial Crops and Products**, Amsterdam, v. 28, n. 1, p. 37-46, 2008.

HILLIG, E.; SCHNEIDER, V.E.; WEBER, C.; TECCHIO, R.D. Resíduos de madeira da indústria madeireira - caracterização e aproveitamento. In: ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, 26, 2006, Fortaleza. **Anais...** Fortaleza: Associação Brasileira de Engenharia de Produção, 2006. 7 p.

HIZIROGLU, S.; BAUCHONGKOL, P.; FUEANGVIVAT, V.; SOONTONBURA, W. Selected properties of medium density fiberboard (MDF) panels made from bamboo and rice straw. **Forest Products Journal**, Madison, v. 57, n. 6. p. 46-50, 2007.

HOFFMANN, R.G.; SILVA, G.F.; CHICHORRO, J.F.; FERREIRA, R.L.C.; VESCOVI, L.B. ZANETI, L.Z. Caracterização dendrométrica de plantios de paricá (*Schizolobium amazonicum* Huber ex. Ducke) na região de Paragominas, PA. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, Recife, v.6, n. 4, p. 675-684, 2011.

HUA, J.; CHEN, G.; SHI S,Q. Effect of incorporating chinese poplar in wood chips on fiber refining. **Forest Products Journal**, Madison, v. 60, n. 4, p. 362-365, 2010.

HUA, J.; CHEN, G.; XU, D.; SHI, S.Q. Impact of thermomechanical refining conditions on fiber quality and energy consumption by mill trial. **Bioresources**, Raleigh, v. 7, n. 2, p. 1919-1930, 2012.

HUNT, J.F.; O'DELL, J.; TURK, C. Fiberboard bending properties as a function of density, thickness, resin, and moisture content. **Holzforschung**, Berlin, v. 62, n. 5, p. 569-576, 2008.

INSTITUTO BRASILEIRO DE DESENVOLVIMENTO FLORESTAL - IBDF. **Madeiras da Amazônia**: características e utilização - Estação experimental de Curuá-Una. Brasília: CNPq, 1988. v. 2, 113 p.

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. **A influência de variáveis de processamento sobre propriedades de chapas de partículas de diferentes espécies de Pinus**. 1989. 130p. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 1989.

IWAKIRI, S.; MATOS, J.L.M.; TRIANOSKI, R.; PRATA, J.G. Produção de painéis aglomerados homogêneos e multicamadas de *Melia azedarach* (Cinamomo) e *Pinus taeda* com diferentes teores de resina. **Cerne**, Lavras, v. 18, n. 3, p. 465-470, 2012a.

IWAKIRI, S.; KEINERT JR, S.; ALBUQUERQUE, C.E.C.; LATORRACA, J.V.F.; MENDES, L.M. **Painéis de madeira reconstituída**. 1. ed. Curitiba: FUPEF, 2005. 247 p.

IWAKIRI, S.; VIANEZ, B.F.; WEBER, C.; TRIANOSKI, R.; ALMEIDA, V.C. Avaliação das propriedades de painéis aglomerados produzidos com resíduos de serrarias de nove espécies de madeiras tropicais da Amazônia. **Acta Amazonica**, Manaus, v. 42, n. 1, p. 59-64, 2012b.

IWAKIRI, S.; MATOS, J.L. M.; PINTO, J.A.P.; VIANA, L.C.; SOUZA, M.M.; TRIANOSKI, R.; ALMEIDA, V.C. Produção de painéis laminados unidirecionais - LVL com lâminas de *Schilobium amazonicum*, *Eucalyptus saligna* e *Pinus taeda*. **Cerne**, Lavras, v. 16, n. 4, p. 557-563, 2010.

IWAKIRI, S.; VARGAS, C.A.; PARCHEN, C.F.A.; WEBER, C.; BATISTA, C.C.; GARBE, E.A.; CIT, E.J.; PRATA, J.G. Avaliação da qualidade de painéis compensados produzidos com lâminas de madeira de *Schizolobium amazonicum*. **Revista Floresta**, Curitiba, v. 42, n. 3, p. 451-458, 2011.

JESUS, R. C. S. DE. **Características anatômicas e físicas da madeira de paricá (*Schizolobium amazonicum* Huber ex. Ducke), plantadas em diferentes espaçamentos e condições ambientais no município de Aurora do Pará – PA**. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Universidade Federal Rural da Amazônia, Belém, 2004. 127 p.

KARTAL, S.N.; GREEN III, F. Decay and termite resistance of medium density fiberboard (MDF) made from different wood species. **International Biodeterioration and Biodegradation**, Barking, v. 51, n. 1, p. 29-35, 2003.

KELLY, M.W. **A critical literature review of relationships between processing parameters and physical properties of particleboards**. 1 ed. Madison: U.S. Forest Products Laboratory, 1977. 66 p. (General Technical Report, FPL-10).

KOLLMANN, F.F.P; KUENZL, E.W.; STAMM, A.J. **Principles of wood Science and Technology: Wood Based Machine**. Berlin: Springer-Verlag, 1975. 703 p.

KRZYSIK, A.M.; YOUNGQUIST, J.A.; BOWERS, H. Medium density fiberboard panels from waste wood and paper. In: KONFERENCJA NAUKOWA WYDZIAŁU TECHNOLOGII DREWNA, 11, 1997, Varsóvia. **Proceedings...** Varsóvia: SGGW, 1997. 10 p.

KRZYSIK, A.M.; MUEHL, J.H.; YOUNGQUIST, J.A.; FRANCA, F.S. Medium density fiberboard made from *Eucalyptus saligna*. **Forest Products Journal**, Madison v. 51, n. 10, p. 47-50, 2001.

LATORRACA, J.V.F.; ALBUQUERQUE, C.E.C. Efeito do rápido crescimento sobre as propriedades da madeira. **Floresta e Ambiente**, Seropédica, v.7, n.1, p.279-291, 2000.

LEE, S.M.; PARK, J.Y.; PARK, S.B.;HWANG, W.J. Effects of melamine on the properties of medium-density fiberboards fabricated with urea-based resins. **Forest Products Journal**, Madison, v. 62, n. 3, p. 207-213, 2012.

LESSMANS, V.E. **Estudo da reação de cura de resinas uréia-formol por espectrometria de ressonância magnética nuclear**. 2008. 105 p. Dissertação (Mestrado em Química) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2008.

LI, J., PANG, S. Modelling of energy demand in an MDF plant. In: CONFERENCE PROCEEDINGS OF CHEMECA, 2006, Auckland. **Proceeding...** Auckland: CHEMECA, 2006. 6 p.

LOBÃO, M.S.; CHAGAS, M.P.; COSTA, D.S.P.; FERREIRA, A.T.B.; SETTE JR, C.R.; CARVALHO, I.L.; TOMAZELLO FILHO, M. Agrupamento de espécies florestais pela similaridade das características físico-anatômicas e usos da madeira. **Cerne**, Lavras, v. 15, Suplemento, p. 97-105, 2010.

MALONEY, T. M. **Modern particleboard and dry-process fiberboard manufacturing**. San Francisco: Miller Freeman, 1977. 672p.

MARINHO, N.P.; NASCIMENTO, E.M. NISGOSKI, S.; VALARELLI, I.D. Some physical and mechanical properties of medium-density fiberboard made from giant bamboo. **Material Research**, São Carlos, v. 16, n. 6, p. 1387-1392, 2013.

MARQUES, L.C.T.; YARED, J.A.G.; SIVIERO, M.A. **A Evolução do conhecimento sobre o Paricá para reflorestamento no Estado do Pará**. Belém: Embrapa Amazônia Oriental, 2006. 5 p. (Comunicado técnico, 158).

MARQUES, T.C.L.L.S.M.; CARVALHO, J.G.; LACERDA, M.P.C.; MOTA, P.E.F. Crescimento inicial do Paricá (*Schizolobium amazonicum*) sob omissão de nutrientes e de sódio em solução nutritiva. **Cerne**, Lavras, v. 10, n. 2, p. 184-195, 2004.

MARTINI, A.; ROSA, N. A.; UHL, C. **Espécies de árvores potencialmente ameaçadas pela atividade madeireira na Amazônia**. Belém: IMAZON, 1998. 34p. (Série Amazônia, 11)

MELO, R.R.; MENEZZI, C.H.S.D.; SOUZA, M.R.; STANGERLIN, D.M.; MELO, R.R.; MENEZZI, C.H.S.D.; SOUZA, M.R.; STANGERLIN, D.M. Avaliação das propriedades físicas, químicas, mecânicas e de superfície de lâminas de paricá (*Schizolobium amazonicum* Huber ex. Ducke). **Floresta e Ambiente**, Seropédica, v. 20, n. 2, p. 238-249, 2013.

MYERS, G.C. Characterization of fiberboard pulp. **Forest Products Journal**, Madison, v. 37, n. 2, p. 30-36, 1987.

MYERS, G.C.; CRIST, J.B. Feasibility of manufacturing hardboard from short-rotation intensively cultured *Populus*. **Forest Products Journal**, Madison, v. 36, n. 1, p. 37-44, 1986.

MOSLEMI, A.A. **Particleboard**: materials. London: Southern Illinois University, 1974a. v. 1, 224p.

MOSLEMI, A.A. **Particleboard**: technology. London: Southern Illinois University, 1974b. v. 2, 245 p.

NEMLI, G. ÇOLAKOĞLU, G. Effects of mimosa bark usage on some properties of particleboard. **Turkish Journal of Agriculture and Forestry**, Ankara, v. 29, n. 3, p. 227-230, 2005.

NIEMZ, P.; DIENER, M.; POHLER, E. Determination of the fracture toughness of MDF board. **European Journal of Wood and Wood Products**, Berlin, v. 55, n. 5, p. 327-330, 1997.

ONUORAH, E.O. Properties of fiberboards made from oil palm (*Elaeis guineensis*) stem and/or mixed tropical hardwood sawmill residues. **Journal of Tropical Forest Science**, Kuala Lumpur, v. 17, n. 4, p. 497-507, 2005.

PARK, B.D.; RIEDL, B.; HSU, E.W.; SHIELDS, J. Application of cure-accelerated phenol-formaldehyde (PF) adhesives for three-layer medium density fiberboard (MDF) manufacture. **Wood Science and Technology**, Berlin, v. 35, n. 4, p. 311-323, 2001.

PEZZUTI, J.C.B.; SILVA, D.F. Síntese analítica do mapeamento das condições ambientais da macrorregião de Paragominas. **Papers...** Belém: UFPA/NAEA, v. 236, p. 20, 2006.

PUGEL, A.D.; PRICE, E.W. HSE, C.Y. Composites from southern pine juvenile wood. Part 1. Panel fabrication and initial properties. **Forest Products Journal**, Madison, v. 40, n.1, p.29-33, 1990a.

PUGEL, A.D.; PRICE, E.W.; HSE, C.Y. Composites from southern pine juvenile wood. Part 2. Durability and dimensional stability. **Forest Products Journal**, Madison, v. 40, n.3, p. 57-61, 1990b.

PUGEL, A.D.; PRICE, E.W.; HSE, C.Y.; SHUPE, T.F. Composites from southern pine juvenile wood. Part 3. Juvenile and mature wood furnish mixture. **Forest Products Journal**, Madison, v. 54, n.1, p.47-52, 2004.

SANTOS, Z.M.; MENDOZA, H.; EVANGELISTA, W.V.; ARAÚJO, S.O.; SOUZA, C.C.; RIBEIRO, F.D.L.; SILVA, J.C. Análise dos resíduos madeireiros gerados nas marcenarias do município de Viçosa - Minas Gerais. **Revista Árvore**, Viçosa, v.34, n.4, p.755-760, 2010.

SHUPE, T.F.; HSE, C.Y.; CHOONG, E.T.; GROOM, L.H. Effect of silvicultural practice and wood type on loblolly pine particleboard and medium density fiberboard properties. **Holzforschung**, Berlin, v. 53, n. 2, p. 215-222, 1999.

SILVA, J.J.N.S.; CARDOSO, G.V.; SILVA JÚNIOR, F.G.; STANGERLIN, D.M. Caracterização tecnológica da madeira de *Schizolobium amazonicum* para a produção de celulose kraft. **Ciência da Madeira**, Pelotas, v. 04, n. 01, p. 33-45, 2013.

SILVA, M.G.; NUMAZAWA, S.; ARAUJO, M.M.; NAGAISHI, T.Y.R.; GALVÃO, G.R. Carvão de resíduos de indústria madeireira de três espécies florestais exploradas no município de Paragominas, Pa. **Acta Amazonica**, Manaus, v. 37, n. 1, p. 61-70, 2007.

SMITH, D. M. **Maximum moisture content method for determining specific gravity of small wood samples**. Madison: Forest Products Laboratory , 1954. 8 p.

SNELL, R.; GROOM, L.H.; RIALS, T.G. Characterizing the surface roughness of themomechanical pulp fibers with atomic force microscopy. **Holzforschung**, Berlin, v. 55, n. 5, p. 511-522, 2001.

SOUZA, C.R.; ROSSI, L.M.B.; AZEVEDO, C.P.; VIEIRA, A.H. **Paricá: *Schizolobium parahyba* var. *amazonicum* (Huber x Ducke) Barneby**. Manaus: Embrapa Amazônia Ocidental, 2003. 12 p. (Circular Técnica, 18).

SOUZA, M. H.; MAGLIANO, M.M.; CAMARGO, J.A.A. **Madeiras Tropicais Brasileiras**. 1 ed. Brasília: IBAMA, 1997. v. 1. 152 p.

SURDI, P.G. **Produção de painéis de partículas orientadas (OSB) a partir da madeira de um híbrido de *Pinus elliottii* var. *elliottii* x *Pinus caribaea* var. *hondurensis***. 2012. 99 p. Dissertação (Mestrado em Recursos Florestais) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2012.

SURDI, P. G.; BORTOLETTO JR, G.; CASTRO, V. R.; MENDES, R. F.; ALMEIDA, N. F.; TOMAZELLO FILHO, M. Relação entre perfil de densidade e ligação interna de painéis OSB de *Pinus* spp. **Floresta e Ambiente**, Seropédica, v. 21, n. 3, p. 349-357, 2014.

TEREZO, R. F. **Avaliação tecnológica do paricá e seu uso em estruturas de madeira laminada colada**. 2010. 177 p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2010.

TONINI, H.; PEREIRA, M.R.N.; ARCO - VERDE, M.F.; OLIVEIRA JUNIOR, M.M. de. **Seleção de equações para o paricá (*Schizolobium amazonicum* Huber ex Ducke), no Estado de Roraima**. Boa Vista: Embrapa Roraima, 2005. 19 p. (Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento, 04).

TORQUATO, L.P. **Caracterização dos painéis MDF comerciais produzidos no Brasil**. 2008. 93 p. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2008.

TREMACOLDI, C.R.; LUNZ, A.M.; COSTA, F.R.S. Cancro do paricá (*Schizolobium parahyba* var. *amazonicum*) no Estado do Pará. **Revista Pesquisa Florestal Brasileira**, Colombo, v. 59, n. 1, p. 69-73, 2009.

TUOTO, M. **Levantamento sobre a geração de resíduos provenientes da atividade madeireira e proposição de diretrizes para políticas, normas e condutas técnicas para promover o seu uso adequado**. Brasília: Ministério do Meio Ambiente, 2009. 35 p.

VALENÇA, A.C.V.; ROQUE, C.A.; SOUZA, P.Z. **Caracterização e uso do MDF**. 2000. Disponível em <http://www.remade.com.br/br/artigos_tecnicos_download.php?num=1066&categoria=&subcategoria=&title=Caracteriza%20E3o%20e%20usos%20do%20MDF>. Acesso em: 13 fev. 2014.

VERÍSSIMO, A.; LIMA, E.; LENTINI, M. **Polos madeireiros do Estado do Pará**. 1 ed. Belém: IMAZON, 2002. 74 p.

VIDAURRE, G.B. **Caracterização anatômica, química e físico-mecânica da madeira de paricá (*Schizolobium amazonicum*) para produção de energia e polpa celulósica**. 2010. 74 p. Tese (Doutorado em Ciência Florestal) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2010.

VIDAURRE, G.B.; CARNEIRO, A.C.O.; VITAL, B.R.; SANTOS, R.C.; VALLE, M.L.A. Propriedades energéticas da madeira e do carvão de paricá (*Schizolobium amazonicum*). **Revista Árvore**, Viçosa, v. 36, n. 2, p. 365-371, 2012.

VIDAURRE, G.B.; LOMBARDI, L.R.; OLIVEIRA, J.T.S.; ARANTES, M.D.C. Lenho juvenil e adulto e as propriedades da madeira. **Floresta e Ambiente**, Seripédica, v. 18, n. 4, p. 469-480, 2011.

WANG, S.; WINISTORFER, P.M.; YOUNG, T.M. Fundamentals of vertical density profile formation in wood composites. Part III. MDF density formation during hot-pressing. **Wood and Fiber Science**, Madison, v. 36, n. 1, p. 17-25, 2004.

WANG, X.; SELENIKOVICH, A.; MOHAMMAD, M. Localized density effects on fastener holding capacities in wood-based panels. **Forest Products Journal**, Madison, v. 57, n. 1/2, p. 103-109, 2007.

WILCZYNSKI, A.; KOCISZEWSKI, M. Bending properties of particleboard and MDF layers. **Holzforschung**, Berlim, v. 61, n. 6, p. 717-722, 2007.

WINANDY, J. E.; KRZYSIK, A.M. Thermal degradation of wood fibers during hot-pressing of MDF composites: Part 1. Relative effects and benefits of thermal exposure. **Wood and Fiber Science**, Madison, v. 39, n. 3, p. 450-461, 2007.

WONG, E. D.; ZHANG, M.; WANG, Q.; HAN, G.; KAWAI, S. Formation of the density profile and its effects on the properties Formation of the density profile and its effects on the properties. **Journal of Wood Science**, Tokyo, v. 43, n. 3, p. 202-209, 2000.

WOODSON, G.E. Effects of bark, density profile, and resin content on medium-density fiberboard from southern hardwoods. **Forest Products Journal**, Madison, v. 26, n. 2, p. 39-42, 1976.

WOOD PANELS INDUSTRIES FEDERATION – WPIF. **Information**. Disponível em: <<http://www.wpif.org.uk>> Acesso em: 13 de jan. 2014

XING, C.; DENG, J.; ZHANG, S. Y. Effect of thermo-mechanical refining on properties of MDF made from black spruce bark. **Wood Science Technology**, Berlin, v. 41, n. 4, p. 329-338, 2007.

XING, C.; DENG, J.; ZHANG, S.Y.; RIEDL, B. Impact of bark content on the properties of medium density fiberboard (MDF) in four species grown in eastern Canada. **Forest Products Journal**, Madison, v. 56, n. 3, p. 64-69, 2006a.

XING, C.; WANG, S.; PHARR, G.M.; GROOM, L.H. Effect of thermo-mechanical refining pressure on the properties of wood fibers as measured by nanoindentation and atomic force microscopy. **Holzforschung**, Berlin, v. 62, n. 2, p. 230–236, 2008.

XING, C.; DENG, J.; ZHANG, S.Y.; RIEDL, B.; CLOUTIER, A. Properties of MDF from black spruce tops as affected by themomechanical refining conditions. **European Journal of Wood and Wood Products**, Berlin, v. 64, n. 6, p. 507-512, 2006b.

XING, C.; RIEDL, B.; CLOUTIER, A.; DENG, J.; ZHANG, S.Y. UF resin efficiency of MDF as affected by resin content loss, coverage level and pre-cure. **European Journal of Wood and Wood Products**, Berlin, v. 64, n. 3, p. 221-226, 2006c.

YE, X.P.; JULSON, J.; KUO, M.; WOMAC, A.; MYERS, D. Properties of density fiberboards made from renewable biomass. **Bioresource Technology**, Raleigh, v. 98, n. 5, p. 1077-1084, 2007.

ANEXOS

Análise estatística

Tabela 35 - Análise de variância dos fatores de tratamento para a variável densidade básica das madeiras

FV	GL	SQ	QM	Fc	Pr>Fc
TRATAMENTO	2	0,669825	0,334913	335,912	0,0000*
ERRO	21	0,020938	0,000997		
Total corrigido	23	0,690763			
CV (%)	7,63				
Média geral	0,41375				
Nº de observações	24				

* significativo ao nível de 5% de probabilidade de erro

Tabela 36 - Análise de variância dos valores de tratamento para a variável comprimento das fibras de cavacos

FV	GL	SQ	QM	Fc	Pr>Fc
TRATAMENTO	2	1593504,552087	796752,276044	20,045	0,0000*
ERRO	51	2027150,657674	39748,052111		
Total corrigido	53	3620655,209761			
CV (%)	15,14				
Média geral	1270,08585				
Nº de observações	54				

* significativo ao nível de 5% de probabilidade de erro

Tabela 37 - Análise de variância dos valores de tratamento para a variável largura das fibras de cavacos

FV	GL	SQ	QM	Fc	Pr>Fc
TRATAMENTO	2	1677,680225	838,840113	54,858	0,0000*
ERRO	51	779.852580	15,291227		
Total corrigido	53	2457,532805			
CV (%)	14,40				
Média geral	27,1562574				
Nº de observações	54				

* significativo ao nível de 5% de probabilidade de erro

Tabela 38 - Análise de variância dos valores de tratamento para a variável diâmetro do lume das fibras de cavacos

FV	GL	SQ	QM	Fc	Pr>Fc
TRATAMENTO	2	4530,034459	2265,017229	101,467	0,0000*
ERRO	51	1138,460994	2,322765		
Total corrigido	53	5668,495453			
CV (%)	24,43				
Média geral	19,3403593				
Nº de observações	54				

* significativo ao nível de 5% de probabilidade de erro

Tabela 39 - Análise de variância dos valores de tratamento para a variável espessura da parede celular das fibras de cavacos

FV	GL	SQ	QM	Fc	Pr>Fc
TRATAMENTO	2	180,287623	90,143812	47,619	0,0000*
ERRO	51	96,544009	1,893020		
Total corrigido	53	276,831632			
CV (%)	35,21				
Média geral	3,9079519				
Nº de observações	54				

* significativo ao nível de 5% de probabilidade de erro

Tabela 40 - Análise de variância dos valores de tratamento para a variável massa específica do Experimento 1

FV	GL	SQ	QM	Fc	Pr>Fc
TRATAMENTO	2	0,000467	0,000233	4,200	0,0723 ^{NS}
ERRO	6	0,000333	0,000056		
Total corrigido	6	0,0008			
CV (%)	1,04				
Média geral	720				
Nº de observações	9				

NS: Não significativo

Tabela 41 - Análise de variância dos valores de tratamento para a variável massa específica do Experimento 2

FV	GL	SQ	QM	Fc	Pr>Fc
TRATAMENTO	1	0,000083	0,000083	0,484	0,5367 ^{NS}
ERRO	3	0,000517	0,000172		
Total corrigido	4	0,0006			
CV (%)	1,60				
Média geral	820				
Nº de observações	5				

NS: Não significativo

Tabela 42 - Análise de variância dos valores de tratamento para a variável massa específica do Experimento 3

FV	GL	SQ	QM	Fc	Pr>Fc
TRATAMENTO	1			0,000	0,9976 ^{NS}
ERRO	4	0,00133	0,000283		
Total corrigido	5	0,001133			
CV (%)	2,36				
Média geral	710				
Nº de observações	6				

NS: Não significativo

Tabela 43 - Análise de variância dos valores de tratamento para a variável massa específica da camada externa dos painéis MDF, obtidos pelo perfil de densidade, realizada do Experimento 1

FV	GL	SQ	QM	Fc	Pr>Fc
TRATAMENTO	2	5740,579693	2870,289847	8,752	0,0045*
ERRO	12	3935,6270	327,96867		
Total corrigido	14	9676,207293			
CV (%)	2,32				
Média geral	779				
Nº de observações	15				

* significativo ao nível de 5% de probabilidade de erro

Tabela 44 - Análise de variância dos valores de tratamento para a variável massa específica da camada central dos painéis MDF, obtidos pelo perfil de densidade, realizada do Experimento 1

FV	GL	SQ	QM	Fc	Pr>Fc
TRATAMENTO	2	3677,774413	1838,887207	28,695	0,00*
ERRO	12	769,01708	64,084757		
Total corrigido	14	4446,791493			
CV (%)	1,25				
Média geral	641				
Nº de observações	15				

* significativo ao nível de 5% de probabilidade de erro

Tabela 45 - Análise de variância dos valores de tratamento para a variável massa específica da camada externa, dos painéis MDF, obtidos pelo perfil de densidade, realizada do Experimento 2

FV	GL	SQ	QM	Fc	Pr>Fc
TRATAMENTO	1	292,6810	292,6810	5,102	0,0538 ^{NS}
ERRO	8	458,94664	57,35933		
Total corrigido	9	751,627640			
CV (%)	0,88				
Média geral	857				
Nº de observações	10				

NS: Não significativo

Tabela 46 - Análise de variância dos valores de tratamento para a variável massa específica da camada central dos painéis MDF, obtidos pelo perfil de densidade, realizada do Experimento 2

FV	GL	SQ	QM	Fc	Pr>Fc
TRATAMENTO	1	199,63024	199,63024	2,693	0,1394 ^{NS}
ERRO	8	593,01052	74,126315		
Total corrigido	9	792,64076			
CV (%)	1,2				
Média geral	720				
Nº de observações	10				

NS: Não significativo

Tabela 47 - Análise de variância dos valores de tratamento para a variável massa específica da camada externa dos painéis MDF, obtidos pelo perfil de densidade, realizada do Experimento 3

FV	GL	SQ	QM	Fc	Pr>Fc
TRATAMENTO	1	5118,906250	5118,90625	18,465	0,0026
ERRO	8	2217,7512	277,2189		
Total corrigido	9	7336,225			
CV (%)	2,14				
Média geral	778				
Nº de observações	10				

* significativo ao nível de 5% de probabilidade de erro

Tabela 48 - Análise de variância dos valores de tratamento para a variável massa específica da camada central dos painéis MDF, obtidos pelo perfil de densidade, realizada do Experimento 3

FV	GL	SQ	QM	Fc	Pr>Fc
TRATAMENTO	1	777,74761	777,74761	5,96	0,0405*
ERRO	8	1043,87864	130,48483		
Total corrigido	9	1821,62625			
CV (%)	1,81				
Média geral	631				
Nº de observações	10				

* significativo ao nível de 5% de probabilidade de erro

Tabela 49 - Análise de variância dos valores de tratamento para a variável absorção de água em duas horas do Experimento 1

FV	GL	SQ	QM	Fc	Pr>Fc
TRATAMENTO	2	11,164689	5,582344	1,836	0,2388 ^{NS}
ERRO	6	18,244733	3,040789		
Total corrigido	8	29,409422			
CV (%)	25,59				
Média geral	6,81				
Nº de observações	9				

NS: Não significativo

Tabela 50 - Análise de variância dos valores de tratamento para a variável absorção de água em vinte e quatro horas do Experimento 1

FV	GL	SQ	QM	Fc	Pr>Fc
TRATAMENTO	2	161,442822	80,721411	3,722	0,0889 ^{NS}
ERRO	6	130,137933	21,689656		
Total corrigido	8	291,580756			
CV (%)	15,10				
Média geral	30,84				
Nº de observações	9				

NS: Não significativo

Tabela 51 - Análise de variância dos valores de tratamento para a variável absorção de água em duas horas do Experimento 2

FV	GL	SQ	QM	Fc	Pr>Fc
TRATAMENTO	1	14,393613	14,393613	31,684	0,0111*
ERRO	3	1,362867	0,454289		
Total corrigido	4	15,756480			
CV (%)	7,32				
Média geral	9,21				
Nº de observações	5				

* significativo ao nível de 5% de probabilidade de erro

Tabela 52 - Análise de variância dos valores de tratamento para a variável absorção de água em vinte e quatro horas do Experimento 2

FV	GL	SQ	QM	Fc	Pr>Fc
TRATAMENTO	1	27,956053	27,956053	73,642	0,0033*
ERRO	3	1,138867	0,379622		
Total corrigido	4	29,09492			
CV (%)	2,66				
Média geral	23,15				
Nº de observações	5				

* significativo ao nível de 5% de probabilidade de erro

Tabela 53 - Análise de variância dos valores de tratamento para a variável absorção de água em duas horas do Experimento 3

FV	GL	SQ	QM	Fc	Pr>Fc
TRATAMENTO	1	9,5256	9,5256	5,026	0,0884 ^{NS}
ERRO	4	7,581733	1,895433		
Total corrigido	5	17,107333			
CV (%)	23,87				
Média geral	5,76				
Nº de observações	6				

NS: Não significativo

Tabela 54 - Análise de variância dos valores de tratamento para a variável absorção de água em vinte e quatro horas do Experimento 3

FV	GL	SQ	QM	Fc	Pr>Fc
TRATAMENTO	1	47,940267	47,940267	6,533	0,0629 ^{NS}
ERRO	4	29,354667	7,338667		
Total corrigido	5	77,294933			
CV (%)	9,18				
Média geral	29,51				
Nº de observações	6				

NS: Não significativo

Tabela 55 - Análise de variância dos valores de tratamento para o inchamento em espessura em duas horas do Experimento 1

FV	GL	SQ	QM	Fc	Pr>Fc
TRATAMENTO	2	0,5694	0,2847	2,998	0,1251 ^{NS}
ERRO	6	0,5698	0,094967		
Total corrigido	8	1,1392			
CV (%)	28,02				
Média geral	1,10				
Nº de observações	9				

NS: Não significativo

Tabela 56 - Análise de variância dos valores de tratamento para o inchamento em espessura em vinte e quatro horas do Experimento 1

FV	GL	SQ	QM	Fc	Pr>Fc
TRATAMENTO	2	1,027489	0,513744	2,094	0,2043 ^{NS}
ERRO	6	1,472067	0,245344		
Total corrigido	8	2,499556			
CV (%)	8,00				
Média geral	6,19				
Nº de observações	9				

NS: Não significativo

Tabela 57 - Análise de variância dos valores de tratamento para o inchamento em espessura em duas horas do Experimento 2

FV	GL	SQ	QM	Fc	Pr>Fc
TRATAMENTO	1	1,264853	1,264853	7,451	0,072 ^{NS}
ERRO	3	0,509267	0,169756		
Total corrigido	4	1,77412			
CV (%)	22,34				
Média geral	1,84				
Nº de observações	5				

NS: Não significativo

Tabela 58 - Análise de variância dos valores de tratamento para o inchamento em espessura em vinte e quatro horas do Experimento 2

FV	GL	SQ	QM	Fc	Pr>Fc
TRATAMENTO	1	8,405813	8,405813	41,187	0,0077*
ERRO	3	0,612267	0,204089		
Total corrigido	4	9,01808			
CV (%)	5,92				
Média geral	7,63				
Nº de observações	5				

* significativo ao nível de 5% de probabilidade de erro

Tabela 59 - Análise de variância dos valores de tratamento para o inchamento em espessura em duas horas do Experimento 3

FV	GL	SQ	QM	Fc	Pr>Fc
TRATAMENTO	1	0,395267	0,395267	45,087	0,0026*
ERRO	4	0,035067	0,008767		
Total corrigido	5	0,430333			
CV (%)	11,24				
Média geral	0,83				
Nº de observações	6				

* significativo ao nível de 5% de probabilidade de erro

Tabela 60 - Análise de variância dos valores de tratamento para o inchamento em espessura em vinte e quatro horas do Experimento 3

FV	GL	SQ	QM	Fc	Pr>Fc
TRATAMENTO	1	8,568150	8,56815	54,332	0,0018*
ERRO	4	0,6308	0,15770		
Total corrigido	5	9,19895			
CV (%)	7,15				
Média geral	5,55				
Nº de observações	6				

* significativo ao nível de 5% de probabilidade de erro

Tabela 61 - Análise de variância dos valores de tratamento para o módulo de ruptura à flexão estática do Experimento 1

FV	GL	SQ	QM	Fc	Pr>Fc
TRATAMENTO	2	38,620289	19,310144	7,981	0,0204*
ERRO	6	14,517267	2,419544		
Total corrigido	8	53,137556			
CV (%)	6,29				
Média geral	24,72				
Nº de observações	9				

* significativo ao nível de 5% de probabilidade de erro

Tabela 62 - Análise de variância dos valores de tratamento para o módulo de ruptura do Experimento 2

FV	GL	SQ	QM	Fc	Pr>Fc
TRATAMENTO	1	11,30988	11,30988	1,348	0,3297 ^{NS}
ERRO	3	25,1746	8,391533		
Total corrigido	4	36,48448			
CV (%)	8,85				
Média geral	32,74				
Nº de observações					

NS: Não significativo

Tabela 63 - Análise de variância dos valores de tratamento para o módulo de ruptura do Experimento 3

FV	GL	SQ	QM	Fc	Pr>Fc
TRATAMENTO	1	138,144017	138,144017	26,759	0,0066*
ERRO	4	20,650267	5,162567		
Total corrigido	5				
CV (%)	27,968333				
Média geral	27,9683333				
Nº de observações	6				

* significativo ao nível de 5% de probabilidade de erro

Tabela 64 - Análise de variância dos valores de tratamento para o módulo de elasticidade do Experimento 1

FV	GL	SQ	QM	Fc	Pr>Fc
TRATAMENTO	2	361862,488867	180931,244433	4,262	0,0705 ^{NS}
ERRO	6	254736,483533	42456,080589		
Total corrigido	8	616598,972400			
CV (%)	7,92				
Média geral	2602,14				
Nº de observações	9				

NS: Não significativo

Tabela 65 - Análise de variância dos valores de tratamento para o módulo de elasticidade do Experimento 2

FV	GL	SQ	QM	Fc	Pr>Fc
TRATAMENTO	1	62641,904653	62641,904653	1,623	0,2924 ^{NS}
ERRO	3	115765,261267	38588,420422		
Total corrigido	4	178407,165920			
CV (%)	5,82				
Média geral	3374,45				
Nº de observações	5				

NS: Não significativo

Tabela 66 - Análise de variância dos valores de tratamento para o módulo de elasticidade do Experimento 3

FV	GL	SQ	QM	Fc	Pr>Fc
TRATAMENTO	1	341155,184017	341155,184017	18,316	0,128 ^{NS}
ERRO	4	74321,164467	18580,291117		
Total corrigido	5	415476,348483			
CV (%)	5,12				
Média geral	2661,55				
Nº de observações	6				

NS: Não significativo

Tabela 67 - Análise de variância dos valores de tratamento para ligação interna do Experimento 1

FV	GL	SQ	QM	Fc	Pr>Fc
TRATAMENTO	2	0,028689	0,014344	3,657	0,0915 ^{NS}
ERRO	6	0,023533	0,003922		
Total corrigido	8	0,052222			
CV (%)	15,83				
Média geral	0,39				
Nº de observações	9				

NS: Não significativo

Tabela 68 - Análise de variância dos valores de tratamento para ligação interna do Experimento 2

FV	GL	SQ	QM	Fc	Pr>Fc
TRATAMENTO	1	0,030720	0,030720	16,457	0,0270*
ERRO	3	0,005600	0,001867		
Total corrigido	4	0,036320			
CV (%)	11,25				
Média geral	0,38				
Nº de observações	5				

* significativo ao nível de 5% de probabilidade de erro

Tabela 69 - Análise de variância dos valores de tratamento para ligação interna do Experimento 3

FV	GL	SQ	QM	Fc	Pr>Fc
TRATAMENTO	1	0,000817	0,000817	0,187	0,6877 ^{NS}
ERRO	4	0,017467	0,004367		
Total corrigido	5	0,018283			
CV (%)	20,54				
Média geral	0,32				
Nº de observações	6				

NS: Não significativo

Tabela 70 - Análise de variância dos valores de tratamento para arranque de parafuso no topo do Experimento 1

FV	GL	SQ	QM	Fc	Pr>Fc
TRATAMENTO	2	39308,733956	19654,366978	5,818	0,394 ^{NS}
ERRO	6	20270,900333	3378,483389		
Total corrigido	8	59579,634289			
CV (%)	7,84				
Média geral	741,49				
Nº de observações					

NS: Não significativo

Tabela 71 - Análise de variância dos valores de tratamento para arranque de parafuso no topo do Experimento 3

FV	GL	SQ	QM	Fc	Pr>Fc
TRATAMENTO	1	7068,547267	7068,547267	1,946	0,2355 ^{NS}
ERRO	4	14529,682667	3632,420667		
Total corrigido	5	21598,229933			
CV (%)	8,93				
Média geral	675,02				
Nº de observações	6				

NS: Não significativo

Tabela 72 - Análise de variância dos valores de tratamento para arranque de parafuso na face do Experimento 1

FV	GL	SQ	QM	Fc	Pr>Fc
TRATAMENTO	2	55047,409689	27523,704844	30,485	0,0007*
ERRO	6	5417,197267	902,866211		
Total corrigido	8	60464,606956			
CV (%)	2,84				
Média geral	1059,66				
Nº de observações	9				

* significativo ao nível de 5% de probabilidade de erro

Tabela 73 - Análise de variância dos valores de tratamento para arranque de parafuso na face do Experimento 2

FV	GL	SQ	QM	Fc	Pr>Fc
TRATAMENTO	1	101798,865120	101798,865120	21,870	0,0185*
ERRO	3	13964,330200	4654,776733		
Total corrigido	4	115763,195320			
CV (%)	6,91				
Média geral	987,33				
Nº de observações	5				

* significativo ao nível de 5% de probabilidade de erro

Tabela 74 - Análise de variância dos valores de tratamento para arranque de parafuso na face do Experimento 3

FV	GL	SQ	QM	Fc	Pr>Fc
TRATAMENTO	1	51165,594150	51165,594150	7,795	0,0492*
ERRO	4	26257,265600	6564,316400		
Total corrigido	5	77422,859750			
CV (%)	8,88				
Média geral	912,83				
Nº de observações	6				

* significativo ao nível de 5% de probabilidade de erro