

UNIVERSIDADE DO ESTADO DE SANTA CATARINA – UDESC
CENTRO DE CIÊNCIAS AGROVETERINÁRIAS – CAV
PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA FLORESTAL

JOELSON LIMA FERREIRA

**INFLUÊNCIA DAS VARIÁVEIS DE PROCESSO NAS PROPRIEDADES
TECNOLÓGICAS DE PAINÉIS DE FIBRAS DE MÉDIA DENSIDADE (MDF)**

LAGES-SC
2020

JOELSON LIMA FERREIRA

**INFLUÊNCIA DAS VARIÁVEIS DE PROCESSO NAS PROPRIEDADES
TECNOLÓGICAS DE PAINÉIS DE FIBRAS DE MÉDIA DENSIDADE (MDF)**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós Graduação em Engenharia Florestal do Centro de Ciências Agroveterinárias da Universidade do Estado de Santa Catarina, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Florestal.

Orientador: Prof. Dr. Alessandro Bayestorff da Cunha
Coorientador: Prof. Dr. Rodrigo Figueiredo Terezo

**LAGES-SC
2020**

**Ficha catalográfica elaborada pelo programa de geração automática da
Biblioteca Setorial do CAV/UEDESC,
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)**

Ferreira, Joelson Lima

Influência das variáveis de processo nas propriedades tecnológicas de painéis de fibras de média densidade (MDF) / Joelson Lima Ferreira. -- 2020.

90 p.

Orientador: Alexsandro Bayestorff da Cunha

Coorientador: Rodrigo Figueiredo Terezo

Dissertação (mestrado) -- Universidade do Estado de Santa Catarina, Centro de Ciências Agroveterinárias, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, Lages, 2020.

1. Painéis reconstituídos de madeira . 2. Tempo de prensagem. 3. Transferência de calor. 4. Estabilidade dimensional. 5. Resistência e rigidez. I. Cunha, Alexsandro Bayestorff da. II. Terezo, Rodrigo Figueiredo. III. Universidade do Estado de Santa Catarina, Centro de Ciências Agroveterinárias, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal. IV. Título.

JOELSON LIMA FERREIRA

**INFLUÊNCIA DAS VARIÁVEIS DE PROCESSO NAS PROPRIEDADES
TECNOLÓGICAS DE PAINÉIS DE FIBRAS DE MÉDIA DENSIDADE (MDF)**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal do Centro de Ciências Agroveterinárias da Universidade do Estado de Santa Catarina, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Florestal.

Banca examinadora:

Orientador:

Prof. Dr. Aleksandro Bayestorff da Cunha
Universidade do Estado de Santa Catarina

Coorientador:

Prof. Dr. Rodrigo Figueiredo Terezo
Universidade do Estado de Santa Catarina

Membros:

Prof.^a Dr.^a Polliana D'Angelo Rios
Universidade do Estado de Santa Catarina

Prof.^a Dr.^a Rosilani Trianoski
Universidade Federal do Paraná

Lages, 29 de outubro de 2020.

Aos meus pais que acreditaram veementemente na conclusão deste trabalho, me nutrindo diariamente de força.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente à Deus, que me fortaleceu, dando o estímulo necessário durante todo o mestrado.

Ao meu orientador, Alessandro Bayestorff da Cunha, por ter acreditado neste projeto e ter concedido a melhor orientação.

Ao meu coorientador Prof. Dr. Rodrigo Figueiredo Terezo pelas sugestões e participação na minha banca de qualificação.

As professoras Dra. Rosilani Trianoski e Dra. Polliana D'Angelo Rios por terem aceito compor a banca responsável pela minha defesa de Mestrado.

A Prof. Dra. Matha Andreia Brand por ter aceito o convite para participação da minha banca de qualificação.

A Prof. Dra. Adriana Matheus da Costa de Figueiredo pela imprescindível contribuição em toda análise estatística do trabalho.

Aos meus pais, Luzair Marcelino Ferreira e Arivone Rodrigues Lima, por todo apoio financeiro e afetivo.

Ao meu orientador do trabalho de conclusão de curso, da graduação, Prof. Dr. Wescley Viana Evangelista, por ter me incentivado, desde a inscrição, a acreditar que tudo daria certo.

A empresa Sudati pela disponibilização do material necessário para manufatura dos painéis, em especial ao Gefferson Costa Liz, que colaborou diretamente com sugestões e aperfeiçoamento do trabalho.

A técnica de laboratório Juliana Dias Siqueira, aos meus amigos de mestrado Gustavo Fagianni Tomio, Sandiane Carla Krefta e Aline Sena pela grande contribuição na produção dos painéis e posterior testes.

A minha amiga Karina Dias dos Santos Xavier, por toda ajuda prestada e apoio que foram extramamente importantes.

Aos demais professores do programa que contribuíram de forma direta para obtenção deste título através da transmissão dos seus conhecimentos.

RESUMO

Os painéis de fibras de média densidade (MDF) são formados pelo entrelaçamento de fibras, aglutinadas pela adição de resina e consolidados pela ação de pressão e calor. Dentre as inúmeras etapas envolvidas no processo de produção, destaca-se a prensagem, que tem a finalidade de curar o adesivo e realizar a consolidação final do painel em espessura e densidade. No entanto, a cura do adesivo não ocorre de forma uniforme ao longo da espessura, não sendo possível estabelecer um tempo padrão, visto que são muitas variáveis envolvidas, tanto relacionadas as matérias-primas, quanto ao processo. O estudo teve por objetivo avaliar a influência do tempo de prensagem nas propriedades tecnológicas de painéis MDF de *Pinus taeda*, de modo a determinar o tempo mínimo da operação, sem prejudicar as propriedades. Foram produzidos painéis MDF com fibras provenientes de um processo industrial, 12% resina uréia formaldeído, 1% de emulsão de parafina e ciclo de prensagem com pressão de 35 kgf/cm² e temperatura de 170 °C. O estudo foi dividido em duas etapas: (i) avaliação da curva de prensagem por meio do uso de termopar tipo K. Nesta etapa foram produzidos 12 painéis com dimensões de 15x15 cm, divididos em 4 tratamentos, caracterizados por duas densidades (650 kg.m⁻³ e 750 kg.m⁻³) e duas espessuras (15 e 18 mm). O termopar foi posicionado na região central do painel, onde permaneceu durante a prensagem até atingir temperatura de 100°C+720 segundos. A leitura da temperatura do termopar foi feita a cada 0,1 segundo. (ii) avaliação das propriedades tecnológicas dos painéis produzidos com densidade 650 kg.m⁻³ e espessuras de 15 e 18 mm, em diferentes tempos de prensagem. Tendo como referência o tempo até o centro do painel atingir 100°C, foram estabelecidos tempos de prensagem para as duas espessuras, totalizando 14 tratamentos, sendo o tratamento 1 da espessura 15 mm com tempo de 2:18 min, tratamento 2 com 3:18 min até o tratamento 7 com 8:18 min; já para espessura 18 mm, o tratamento 8 com 2:52 min e o tratamento 14 com 8:52 min. Os painéis da segunda etapa foram produzidos com área de 1600 cm². A determinação das propriedades dos painéis foi realizada de acordo com os procedimentos descritos na NBR 15316 (ABNT, 2019). Os dados da primeira etapa foram analisados de forma descritiva através de gráficos e tabelas e da segunda pela estatística fatorial. Como resultados, observou-se cinco fases distintas na curva de prensagem, sendo a primeira caracterizada pela baixa ascensão de temperatura, a segunda pelo rápido incremento, ocorrendo o alcance de 100°C no miolo do painel, a terceira pela desaceleração da ascensão, a quarta pela redução por um período prolongado e a quinta pela retomada do aumento de temperatura. Nos resultados para as propriedades físicas e mecânicas observou-se que todas foram influenciadas pelo tempo de prensagem, com exceção da densidade e razão de compactação. Na estabilidade dimensional, houve redução dos valores até um determinado tempo e posteriormente aumento, enquanto que, para as propriedades de resistência e rigidez, o aumento do tempo favoreceu todos os tratamentos. Desta forma, pode-se dizer que o tempo mínimo de prensagem que não afetou as propriedades dos painéis MDF com 650 kg.m⁻³, de maneira a enquadrá-los nos parâmetros estabelecidos pela norma de referência, foi 100°C+3 minutos para a espessura 15 mm e 100°C+4 minutos para a espessura de 18 mm.

Palavras- chave: Painéis reconstituídos de madeira. Tempo de prensagem. Transferência de calor. Estabilidade dimensional. Resistência e rigidez.

ABSTRACT

Medium density fiberboards (MDF) are formed by the interlacing of fibers, bonded by the addition of resin and consolidated by the action of pressure and heat. Among the innumerable steps involved in the production process, the pressing stands out, which has the purpose of curing the adhesive and making the final consolidation of the panel in thickness and density. However, the curing of the adhesive does not occur uniformly along the thickness, and it is not possible to establish a standard time, since there are many variables involved, both related to raw materials and the process. The study aimed to evaluate the influence of the pressing time on the technological properties of *Pinus taeda* MDF panels, in order to determine the minimum operation time, without harming the properties. MDF panels were produced with fibers from an industrial process, 12% urea formaldehyde resin, 1% paraffin emulsion and pressing cycle with a pressure of 35 kgf / cm² and a temperature of 170 °C. The study was divided into two stages: (i) evaluation of the pressing curve using a type K thermocouple. In this stage, 12 panels with dimensions of 15x15 cm were produced, divided into 4 treatments, characterized by two densities (650 kg.m⁻³ and 750 kg.m⁻³) and two thicknesses (15 and 18 mm). The thermocouple was positioned in the central region of the panel, where it remained during pressing until it reached a temperature of 100°C + 720 seconds. The thermocouple temperature was read every 0.1 second. (ii) evaluation of the technological properties of panels produced with a density of 650 kg.m⁻³ and thicknesses of 15 and 18 mm, at different pressing times. With reference to the time until the center of the panel reaches 100°C, pressing times were established for both thicknesses, totaling 14 treatments, with treatment 1 being 15 mm thick with a time of 2:18 min, treatment 2 with 3:18 min until treatment 7 with 8:18 min; for thickness 18 mm, treatment 8 with 2:52 min and treatment 14 with 8:52 min. The second stage panels were produced with an area of 1600 cm². The determination of the properties of the panels was carried out according to the procedures described in NBR 15316 (ABNT, 2019). The data from the first stage were analyzed descriptively using graphs and tables and the second through factor statistics. As a result, five distinct phases were observed in the pressing curve, the first being characterized by low temperature rise, the second by rapid increase, reaching 100°C in the core of the panel, the third by deceleration of the rise, the fourth by reduction for a prolonged period and the fifth for the resumption of temperature increase. In the results for the physical and mechanical properties, it was observed that all were influenced by the pressing time, except for the density and compaction ratio. In the dimensional stability, there was a reduction in the values up to a certain time and later an increase, while, for the properties of resistance and stiffness, the increase in time favored all treatments. Thus, it can be said that the minimum pressing time that did not affect the properties of MDF panels with 650 kg.m⁻³, in order to fit them in the parameters established by the reference standard, was 100°C + 3 minutes for the thickness 15 mm and 100°C + 4 minutes for the thickness of 18 mm.

Keywords: Reconstituted wood panels. Pressing time. Heat transfer. Dimensional stability. Resistance and stiffness.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Comportamento da pressão em função do tempo de prensagem.....	24
Figura 2 - Esquema de evaporação e condensação durante a prensagem a quente	29
Figura 3 - Processo de transferência de calor e massa durante a prensagem a quente	30
Figura 4 - Produção dos painéis 15x15 cm.....	43
Figura 5 - Temperatura na porção central do painel ao longo do tempo de prensagem.....	45
Figura 6 - Produção dos painéis 40x40 cm	61
Figura 7 - Perfil de densidade dos painéis com 15 mm de espessura.....	89
Figura 8 - Perfil de densidade dos painéis com 18 mm de espessura	90

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Plano experimental para avaliação do tempo de prensagem.....	42
Tabela 2 - Tempo final e duração de todas as fases de prensagem	46
Tabela 3 - Temperatura final e variação de temperatura em todas as fases de prensagem	47
Tabela 4 - Variação da temperatura por minuto de prensagem.....	50
Tabela 5 - Valores médios das fases de prensagem em função da densidade	52
Tabela 6 - Valores médios das fases de prensagem em função da espessura.....	53
Tabela 7 - Plano experimental	59
Tabela 8 - Valores médios de densidade e razão de compactação	63
Tabela 9 - Perfil de densidade dos painéis com 15 mm de espessura	65
Tabela 10 - Perfil de densidade dos painéis com 18 mm de espessura	65
Tabela 11 - Valores médios de espessura e teor de umidade	68
Tabela 12 - Valores médios de absorção de água e inchamento em espessura.....	70
Tabela 13 - Valores médios de taxa de não retorno em espessura - TNRE	72
Tabela 14 - Valores médios de MOR e MOE no ensaio de flexão estática	74
Tabela 14 - Valores médios de resistência ao arrancamento de parafuso	76
Tabela 16 - Valores médios de tração perpendicular	77
Tabela 17 - Coeficientes de correlação simples entre as propriedades analisadas	80
Tabela 18 – Propriedades tecnológicas X parâmetros de referência - painéis 15 mm	81

Tabela 19 – Propriedades tecnológicas X parâmetros de referência - painéis 18 mm81

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AA	Absorção de água
AP	Arrancamento de parafuso
APS	Arrancamento de parafuso de superfície
APT	Arrancamento de parafuso de topo
D	Densidade
E	Espessura
HDF	<i>High density fiberboard</i>
IBÁ	Indústria brasileira de árvores
IE	Inchamento em espessura
MDF	<i>Medium density fiberboard</i>
MDP	<i>Medium density particleboard</i>
MIN	Minuto
MOE	Módulo de elasticidade
MOR	Módulo de ruptura
NS	Não significativo
OH	Hidroxila
OSB	<i>Oriented strand board</i>
RC	Razão de compactação
pH	Potencial hidrogeniônico
TNRE	Taxa de não retorno em espessura
TP	Tração perpendicular
TU	Teor de umidade
UF	Ureia formaldeído

SUMÁRIO

CAPÍTULO I – INTRODUÇÃO, OBJETIVOS E REVISÃO DE LITERATURA	16
1 INTRODUÇÃO	16
2 OBJETIVOS	18
2.1 Objetivo geral	18
2.2 Objetivos específicos	18
3 REVISÃO DE LITERATURA	19
3.1 Painéis de madeira	19
3.1.1 Painéis de fibras de média densidade (MDF).....	19
3.1.2 Densidade do painel	21
3.1.3 Espessura	22
3.1.4 Ciclo de prensagem	23
3.1.4.1 Pressão.....	23
3.1.4.2 Temperatura	24
3.1.4.3 Tempo.....	25
3.1.5 Tipos de transferência de calor	27
3.1.5.1 Transferência de calor em materiais porosos	28
3.1.5.2 Transferência de calor em painéis reconstituídos de madeira	29
3.1.5.3 Métodos empregados para medição da transferência de calor	31
4 CONSIDERAÇÕES FINAIS	33
REFERÊNCIAS	34
CAPÍTULO II - AVALIAÇÃO DO PROCESSO DE Prensagem de Painéis MDF	40
1 INTRODUÇÃO	40
2 MATERIAL E MÉTODOS	42
2.1 Matéria-prima	42

2.2 Plano experimental	42
2.3 Produção dos painéis para avaliação do tempo de prensagem	42
2.4 Análise dos dados	44
3 RESULTADOS E DISCUSSÃO	45
3.1 Comportamento da temperatura em função do tempo de prensagem	45
3.2 Influência da densidade no tempo de prensagem	52
3.3 Influência da espessura no tempo de prensagem	53
4 CONCLUSÃO	54
REFERÊNCIAS	55
CAPÍTULO III - INFLUÊNCIA DO TEMPO DE PRENSAGEM NAS PROPRIEDADES TECNOLÓGICAS DOS PAINÉIS DE FIBRAS DE MÉDIA DENSIDADE	57
1 INTRODUÇÃO	57
2 MATERIAL E MÉTODOS	59
2.1 Matéria-prima	59
2.2 Plano experimental	59
2.3 Produção dos painéis	60
2.4 Caracterização tecnológica dos painéis	61
2.5 Análise dos dados	62
3 RESULTADOS E DISCUSSÃO	63
3.1 Propriedades físicas dos painéis	63
3.1.1 Densidade e razão de compactação	63
3.1.2 Perfil de densidade.....	65
3.1.3 Espessura e teor de umidade.....	67
3.1.4 Estabilidade dimensional	69
3.2 Propriedades mecânicas	73
3.2.1 Flexão estática	73
3.2.2 Arrancamento de parafuso.....	75

3.2.3 Tração perpendicular	77
3.3 Correlação entre as propriedades avaliadas	79
3.4 Propriedades tecnológicas X Parâmetros de referência	81
4 CONCLUSÃO	82
5 SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS	83
REFERÊNCIAS	84
APÊNDICE	89

CAPÍTULO I – INTRODUÇÃO, OBJETIVOS E REVISÃO DE LITERATURA

1 INTRODUÇÃO

O MDF (*Medium Density Fiberboard*) é um painel de madeira reconstituída formado por fibras de madeira, aglutinadas e compactadas entre si com resina sintética, por meio da ação conjunta de pressão e calor. Pelas suas características, é amplamente utilizado na indústria moveleira para frontais em peças com usinagens e trabalho de baixo relevo, no fundo de móveis, lateral e fundo de gavetas e também para artesanatos diversos. Na construção civil é utilizado para fabricação de pisos, rodapés, almofadas de portas, batentes, portas usinadas, peças torneadas como balaústres de escadas, pés de mesas e também em embalagens (BRASIL *et al.*, 2003).

Como os painéis MDF, têm uma ampla diversidade de aplicações, é imprescindível que suas características estejam de acordo com os parâmetros estabelecidos pelas normas de qualidade. Assim, torna-se importante conhecer os fatores que interferem diretamente nas suas propriedades, tanto os relacionados a matéria-prima como a densidade e teor de umidade da madeira, quanto aos relacionados ao processo como densidade e espessura do painel, adesivo e variáveis do ciclo de prensagem como temperatura, pressão e tempo de prensagem (TORQUATO, 2008; MELO; MENEZZI, 2010).

Levando-se em consideração os fatores envolvidos sobre o tempo de prensagem, e conhecidas as propriedades que esta etapa influencia no produto final, torna-se indispensável conhecer detalhadamente o seu processo. De maneira geral, buscam-se tempos de prensagem reduzidos, o que reflete em um menor consumo de energia, maior produção unidade/tempo e, conseqüentemente, menor custo final do produto. Em contrapartida, um tempo inadequado, ou seja, insuficiente, pode vir a causar sérios problemas de qualidade, sobretudo pelo gradiente de densidade, onde o miolo não atinge o equilíbrio térmico e a resina não chega ao ponto de cura (ALMEIDA, 2006).

A densidade do painel influencia fortemente no processo de produção de painéis de madeira reconstituída, principalmente, na transferência de calor durante a prensagem a quente. Rofii *et al.* (2016) trabalhando com diferentes densidades para avaliar a transferência de calor no interior de painéis particulados, constatou que as maiores densidades apresentaram fases mais duradouras, com destaque para fase de evaporação, exigindo maiores tempos de prensagem para polimerização efetiva do adesivo. Albuquerque (2002) justifica que painéis com menor densidade possuem mais espaços internos, o que favorece o deslocamento dos vapores aquecidos, além também da menor quantidade de material a ser aquecido.

Na prensagem de painéis MDF estão envolvidos diversos fenômenos físicos, químicos e mecânicos, que tornam esta operação bastante complexa. Os fenômenos mais importantes são: a transferência de calor e massa e a reação de polimerização do adesivo (CARVALHO, 1999).

A transferência de calor e massa no interior do colchão é um processo extremamente complexo. A umidade presente na superfície do colchão vaporiza e forma uma pressão de vapor com o aumento da temperatura. O calor flui verticalmente em direção ao centro do colchão. Após atingir 100°C, temperatura de ebulição da água, ocorre a aceleração da vaporização e, o consequente aumento da pressão de vapor que permite a sua liberação horizontal pelas bordas dos painéis (KAVAZOVIC *et al.*, 2010; ROFII *et al.*, 2014).

A reação de polimerização do adesivo é um ponto crucial da prensagem a quente. Segundo Cyr *et al.* (2006) o adesivo representa 29 % do custo final da produção de painéis MDF, sendo a sua eficiência um fator preponderante não apenas no custo, mas também no desempenho final do produto. Dunky (1998) e Minopoulou *et al.* (2003) citados por Liu *et al.* (2008) explicam que o processo de polimerização por condensação da resina Ureia Formaldeído (UF) é dividida em duas etapas, geralmente uma metilação alcalina seguida por condensação ácida, onde a metilação refere-se a adição de até quatro moléculas de formaldeído bifuncional em uma molécula de ureia.

Diante do papel de destaque que os painéis de madeira têm apresentado na economia mundial, algumas discussões estão acontecendo, sobre qual o melhor método de produção para proporcionar as melhores propriedades e o menor custo possível. A partir do dinamismo existente no processo de produção de painéis MDF, no qual não é possível determinar ciclos de prensagem padrões, visto os inúmeros fatores envolvidos. Esse trabalho mostra-se relevante, onde na literatura é possível encontrar inúmeros trabalhos que investigaram a interferência do tempo de prensagem nas propriedades tecnológicas de painéis particulados. Entretanto, o mesmo não é observado em painéis de fibras de média densidade.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

Avaliar a influência do tempo de prensagem nas propriedades tecnológicas dos painéis de fibras de média densidade (MDF) com diferentes espessuras (15 e 18 mm), de modo a determinar o tempo mínimo de prensagem, visando garantir uma produção satisfatória com propriedades físicas e mecânicas equivalentes ao estabelecido pela norma de referência.

2.2 Objetivos específicos

- ✓ Determinar o tempo de prensagem para a camada central do painel atingir 100°C;
- ✓ Avaliar o comportamento da transferência de calor durante o processo de prensagem;
- ✓ Avaliar a influência da densidade e da espessura na transferência de calor;
- ✓ Avaliar a influência do tempo de prensagem na estabilidade dimensional e nas propriedades de resistência e rigidez dos painéis;
- ✓ Comparar os valores obtidos nos ensaios com os parâmetros estabelecidos pela NBR 15316-2 (ABNT, 2019).

3 REVISÃO DE LITERATURA

3.1 Painéis de madeira

Como definem Mattos, Gonçalves e Chagas (2008), os painéis de madeira são estruturas fabricadas com madeiras em lâminas ou em diferentes estágios de desagregação, que são aglutinadas. Esse tipo de produto pode ser empregado para diversos fins, chegando até mesmo a substituir a madeira maciça, sobretudo na fabricação de pisos e móveis, alternativa essa, altamente lucrativa, já que o custo final de peças produzidas a partir de painéis de madeira é bem menor do que as produzidas a partir da madeira maciça.

Dentro do grupo dos painéis de madeira reconstituída, destacam-se quatro tipos de painéis: painéis de partículas de média densidade (*Medium Density Particleboard* - MDP), painéis de partículas alongadas e orientadas (*Oriented Strand Board* – OSB), painéis de fibras de média densidade (*Medium Density Fiberboard* – MDF) e painéis de fibras de alta densidade (*Hard Density Fiberboard* – HDF) (MATTOS; GONÇALVES; CHAGAS, 2008).

A crescente melhoria no cenário brasileiro de painéis de madeira reconstituída pode ser observada nos percentuais de produção de 2018, mesmo com aumento tímido, foram eles os responsáveis por aquecer o mercado interno, já que 84% da produção ficou no Brasil, e ainda contribuiu para a impulsionar a exportação de produtos desse segmento (16%). O Brasil alcançou um aumento de 2,8% em relação a 2017, que permitiu o alcance de 8,2 milhões m³ produzidos de painéis, garantindo o posto de 8º maior produtor no ranking mundial. Atualmente o Brasil conta com 23 unidades produtoras de painéis de madeira reconstituída, distribuídas, sobretudo nas regiões Sul e Sudeste (IBÁ, 2019).

3.1.1 Painéis de fibras de média densidade (MDF)

A fabricação dos painéis MDF no Brasil é recente, sendo os primeiros exemplares produzidos em setembro de 1997 em Agudos/SP pela empresa Duratex. Desde então, os avanços foram significativos devido à grande quantidade de pesquisas e testes desenvolvidos em torno dessas peças, visto sua grande versatilidade de aplicações (CAMPOS, 2003).

Os MDF's podem ser definidos como painéis formados pelo processo de prensagem a quente que utiliza como matéria-prima madeira desfibrada termomecanicamente, resina sintética e aditivos como a parafina que visa a redução da higroscopicidade e por fim,

consolidados pela ação conjunta de calor e pressão (ELEOTÉRIO, 2000; BELINI; TOMAZELLO FILHO, 2010; SETTER; MELO; STANGERLIN, 2017).

De maneira geral, sabe-se que as características dos painéis MDF variam de acordo com o processo de fabricação, já que características indesejadas como presença de medula, nós, tensões de crescimento e grãos desalinhadas, ou seja, comuns no uso da madeira sólida são perdidas durante a produção, devendo-se sempre analisar qual o teor e também quais os melhores tipos de resinas a serem utilizadas, além dos demais aditivos, que são componentes que permitem que os painéis adquiram não apenas características básicas, mas também aplicações especiais, como resistência ao fogo e a umidade (CAMPOS; LAHR, 2004).

A densidade desse tipo de painel, segundo a NBR-15316 (2019), varia 651 kg.m^{-3} a 800 kg.m^{-3} , porém, esta não se distribui uniformemente nas peças, havendo maior concentração nas faces. Essa distribuição concentrada principalmente nas faces externas é extremamente benéfica por aumentar a resistência a flexão estática, além de fornecer melhores acabamentos, sobretudo, no que se refere a pintura, deixando o processo mais rápido e econômico devido ao melhor fechamento da superfície (ELEOTÉRIO, 2000).

Para Campos (2003) o MDF é um painel cuja característica principal é a grande estabilidade dimensional e excepcional capacidade de usinagem, tanto nas bordas, quanto nas faces. Conhecer as características de cada painel torna-se imprescindível, uma vez que elas irão determinar as destinações de uso dos mesmos, havendo dessa forma, uma forte correlação entre a aplicação e as propriedades físicas e mecânicas da peça. Weber e Iwakiri (2015) destacam que as restrições técnicas para o uso e a aplicação de diferentes tipos de painéis de madeira envolvem características como resistência mecânica, estabilidade dimensional, uniformidade da superfície, usinabilidade, resistência à fixação de parafusos, entre outros.

Predominantemente o MDF é empregado na indústria moveleira, no entanto, recentemente vem ganhando espaço na construção civil, podendo ser utilizado na fabricação de balaústres de escada, pisos, portas, batentes, rodapés e molduras para ambientes internos e sacadas em ambientes externos, além de atuar como isolante térmico e acústico (CAMPOS; LAHR, 2002; WEBER, 2011).

Essa grande versatilidade de uso apresentada pelo MDF é reflexo de suas vantagens. Além de eliminar características e defeitos que normalmente as madeiras naturais apresentam, o MDF ainda promove a reciclagem de matéria-prima; requer menor quantidade de energia para sua fabricação comparada a outros materiais como plástico, alumínio e aço; agrega valor em materiais normalmente descartados, além de imobilizar carbono em sua composição. Outra vantagem do MDF está na possibilidade de controlar suas qualidades de acordo com a matéria-

prima, resina e metodologia aplicada em sua fabricação, resultando em características especiais requeridas por cada ambiente em que essa peça será utilizada. Além dos pontos abordados, esse tipo de painel dispõe de grande homogeneidade, boa relação entre resistência mecânica e massa específica, excelente usinagem, e acabamentos melhores e mais econômicos devido ao formato de distribuição de densidade das peças (ELEOTÉRIO; FILHO; JÚNIOR, 2000; FERREIRA, 2010).

Conhecidas as vantagens, o MDF também apresenta algumas desvantagens, como o inchamento da peça diante da exposição direta com a água, situação irreversível; peças com rachaduras ou lascas são dificilmente corrigidas; presença de resinas enfraquece e degrada os equipamentos; e geração de grande quantidade de pó durante as operações de acabamento na indústria e nas operações de serragem nas marcenarias (EUGÊNIO, 2016).

Visando reduzir as desvantagens e potencializar as vantagens apresentadas pelos painéis MDF, torna-se extremamente importante conhecer os fatores que podem afetar as características finais das peças, estando estes ligados tanto a matéria prima, adição de aditivos como também ao processamento. Os principais fatores que causam algum tipo de influência sobre o MDF são: qualidade das fibras, teor de umidade dos cavacos, desfibramento, adição de resinas ou adesivos, teor de umidade do colchão, prensagem, alinhamento das fibras, densidade do painel, teor de umidade do painel e aplicação de aditivos (BOM, 2008; LOPES; MACHADO, 2013).

3.1.2 Densidade do painel

Dentre os diversos fatores que podem causar influência sobre a qualidade dos painéis, um dos principais é a sua densidade, em função da interferência sobre as propriedades físicas como estabilidade dimensional e mecânicas como flexão estática. Kelly (1977) explica que quando produzidos com o mesmo tipo de madeira, os painéis de maior densidade possuem maior quantidade de sítios higroscópicos e maior razão de compactação quando comparados aos de menor densidade, o que afeta o inchamento em espessura. Os de maior densidade ao entrarem em contato com a água têm maior liberação de tensões de compressão e, conseqüentemente maior inchamento em espessura.

A melhora das propriedades de resistência como o aumento da densidade do painel é devido a maior quantidade de fibras, maior densificação e compressão durante o processo de formação do painel na prensa; já o maior inchamento, nesta situação, é devido a maior taxa de

liberação de tensões de compressão impostas durante a prensagem (SALDANHA; IWAKIRI, 2009).

O aumento da densidade do painel aliado a utilização de madeira com a mesma densidade é um método sugerido por Maloney (1977) para melhorar as propriedades de resistência mecânica. Esse aumento favorece o contato entre as fibras e também reduz perda de resina em espaços vazios, conferindo maior eficiência na polimerização do adesivo.

Akgul *et al.* (2007) confeccionando painéis MDF de *Quercus robur* com diferentes densidades (600, 700, 800 Kg.m⁻³) perceberam notório aumento do inchamento em espessura nas densidades maiores. Para as propriedades mecânicas como tração perpendicular, módulo de ruptura e módulo de elasticidade foi observado efeito positivo, devido a maior razão de compactação obtida nas maiores densidades.

A densidade do painel apresenta influência no processo de produção, principalmente no ciclo de prensagem. Roffii *et al.* (2014) através de um estudo que avaliou o comportamento da temperatura no interior de painéis MDP com diferentes densidades, perceberam que maiores densidades resultaram no alcance de maiores pressões máximas de vapor, devido a menor permeabilidade e menor convecção de vapor causada pela compactação do colchão durante a prensagem, que limitava sua liberação.

Cai, Muehl e Winandy (2006) trabalhando com diferentes densidades de painéis MDF, concluíram que esta propriedade mostrou relação positiva com o desempenho mecânico, pressão de vapor interna e temperatura máxima no miolo do painel. Por outro lado, reduziu a taxa de aumento da temperatura e o gradiente de espessura da pré-cura do adesivo.

3.1.3 Espessura

No processo de prensagem, durante a redução da espessura do colchão de fibras, estas se orientam, preferencialmente, no sentido horizontal ao plano do painel, resultando em uma considerável pressão das fibras, umas sobre as outras, provocando amplo contato entre as paredes destas fibras e a resina (BUTTERFIELD *et al.*,1992).

Quando observadas as espessuras finais dos painéis, verifica-se que peças mais espessas apresentam maior deformação final com carga, enquanto que peças menos espessas apresentam maior deformação residual (deformação total menos a deformação elástica) (SOUSA, 2012). Pazetto, Del Menezzi e Gonzalez (2015) pesquisando o efeito da espessura na deformação em flexão estática de painéis MDF e MDP, verificaram maiores valores de MOE e MOR, nos painéis de 18 mm, quando comparados aos de 15 mm.

Mendes (2010) relata que a altura do colchão de fibras na etapa de prensagem influencia diretamente a espessura do painel, que segundo o autor, quanto maior a altura do colchão maior será a tensão de compressão atuante sobre o painel e maior será o retorno da espessura.

A espessura final do painel pode estar relacionada com a distribuição das partículas/fibras do colchão além dos espaçadores *stops*, pois maiores alturas do colchão tendem a espalhar mais as dimensões na seção transversal do painel no processo de fechamento da prensa, o que diminui a espessura final (GRUBERT, 2016).

França (2015) em seu estudo com painéis de partículas e fibras resinadas de *Pinus spp.*, obteve diferença estatística em relação a espessura em painéis homogêneos produzidos com 12% de resina ureia formaldeído, no qual a média ficou em 15,94 mm, acima dos espaçadores de 15,50 mm.

3.1.4 Ciclo de prensagem

No processo de prensagem existem diversas variáveis que devem ser acompanhadas, pois influenciam significativamente a qualidade final dos painéis de madeira. Ranita *et al.* (2005) explicam que os principais fatores que atuam sobre o ciclo de prensagem são a temperatura dos pratos, a pressão hidráulica aplicada, a velocidade de fechamento da prensa e a duração do ciclo, ou seja, tempo, temperatura e pressão.

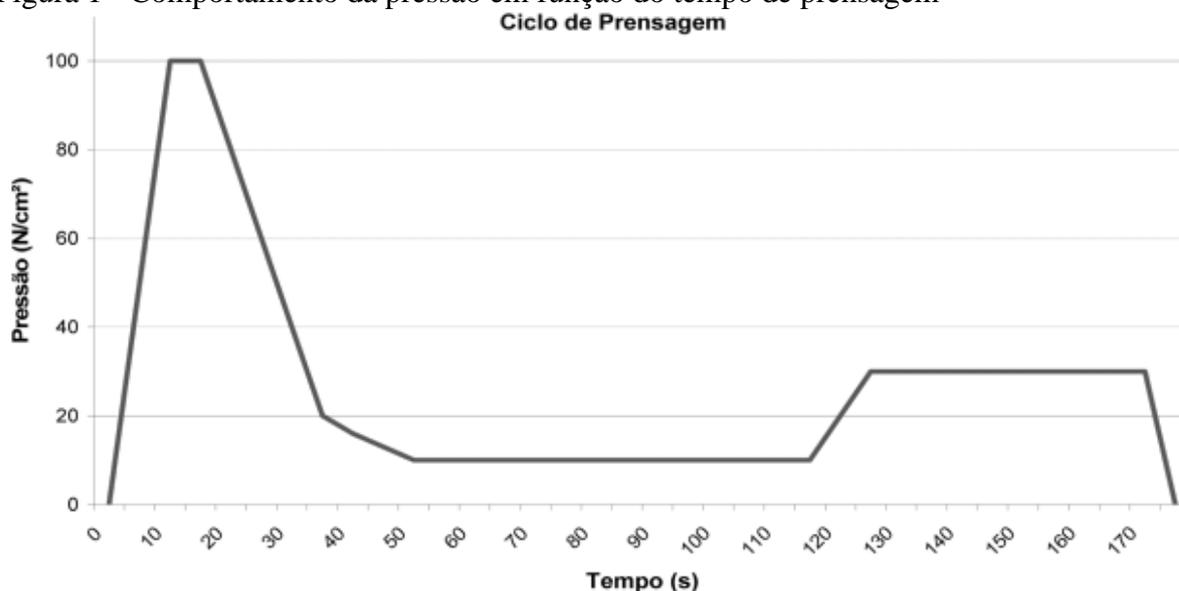
3.1.4.1 Pressão

A pressão tem como função formar painéis através da compressão das fibras até atingir a espessura desejada. A aplicação dessa compressão faz com que fibras alcancem uma maior área de contato entre as superfícies, e quanto maior a área de contato, mais eficiente será a distribuição do adesivo, e conseqüentemente maiores serão as propriedades de resistência. Os níveis de resina aplicados devem ser adequados para as dimensões do painel e massa de fibras, já que a deficiência desse componente requer que maiores níveis de pressão sejam aplicados. Em contrapartida, quando a umidade das fibras é elevada, o processo de prensagem é facilitado, devido a maior plasticização da madeira, e menores níveis de pressão serão aplicados (MATOS, 1988).

A pressão aplicada sobre o colchão ocorre de forma gradativa em virtude dos diferentes cenários encontrados, sobretudo no que diz respeito às variações nos níveis de temperatura e umidade que irão ocorrer de maneira diferente ao longo da espessura da peça e em função do

tempo a que essa pressão está sendo aplicada, visto que nos primeiros instantes é necessário uma pressão mais elevada, e conforme a peça começa a atingir a espessura desejada a mesma pode ser reduzida. Deve-se ainda observar que os espaçadores influenciam diretamente na redução dessa compressão, pois ao ser atingido pela prensa essa energia irá se dissipar tanto entre as fibras como para o próprio espaçador (PAES *et al.*, 2011). Essa distribuição de pressão em função do tempo de prensagem pode ser visualizado no trabalho de Belini, Tomazello Filho e Chagas (2009).

Figura 1 - Comportamento da pressão em função do tempo de prensagem



Fonte: Belini; Tomazello Filho; Chagas (2009).

Paes *et al.* (2011) avaliaram a qualidade de painéis particulados de *Pinus elliottii* colados com resina poliuretana sob diferentes pressões. Para uma mesma temperatura, quando elevado a pressão de 2 para 3 MPa foi verificada melhora expressiva tanto na estabilidade dimensional quanto na resistência e rigidez dos painéis. Cristescu *et al.* (2015) também utilizaram diferentes pressões (4 e 6 MPa) na produção de painéis laminados para identificar o efeito dessa variável na qualidade dos painéis, a maior pressão resultou em menor absorção de água e maior ligação interna.

3.1.4.2 Temperatura

Dentro do ciclo de prensagem, a temperatura atua diretamente no alcance da densidade e espessura pré-estabelecidos, tornando-se responsável pela redução da resistência à compressão, através da plasticização da madeira, além de acelerar a cura do adesivo. A

aplicação de calor sobre o colchão ainda é responsável por aumentar o espalhamento da resina ao longo da superfície do painel, já que a viscosidade que esse componente apresenta é reduzida (MATOS, 1988).

A temperatura dos pratos da prensa deve ser adequada para as condições de produção. Quando muito baixa são necessários níveis mais elevados de pressão para efetuar a mesma função, ao passo que temperaturas muito elevadas aceleram a cura do adesivo nas camadas externas, enquanto que o adesivo nas camadas centrais ainda não atingiu o mesmo estágio. A temperatura da prensa, quando associada de forma adequada ao teor de umidade do colchão e a distribuição das fibras favorecem a dissipação do calor até o miolo torna-o mais uniforme e eficiente (MATOS, 1988). Paes *et al.* (2011, p. 553) explicam que “quanto maior a temperatura de prensagem, maior será o fluxo de calor, permitindo melhor densificação das camadas mais internas dos painéis, resultando em maior resistência das ligações internas e melhor resistência à flexão estática”.

Kelly (1977) cita como as principais funções da temperatura durante a prensagem tanto em painéis de partículas quanto de fibras, são: plasticização da madeira, redução da resistência a compressão, consolidação do colchão para densidade e espessura final desejada e polimerização da resina entre as fibras adjacentes.

As principais funções da temperatura no ciclo de prensagem são a evaporação da umidade no interior do colchão e a aceleração da solidificação do adesivo, para diminuir o atrito e favorecer a fluidez. Gul, Khan e Shakoor, (2017) estudando o desempenho de painéis MDF em função da temperatura de prensagem, obtiveram como resultado a redução da absorção de água em 38,2% e o aumento da ligação interna em 33,6% e do MOR em 9,8%, quando aumentada a temperatura de 140°C para 160°C. Os autores complementam que a escolha da temperatura depende de vários fatores, como matéria-prima, espécie utilizada, teor de umidade do colchão, propriedades da cola, espessura do painel, método de aquecimento, tempo de aquecimento e pressão.

Kargarfard, Nourbakhsh e Hajihassani (2009) observaram influência positiva do aumento da temperatura de 180 ° C para 190 °C, no MOE de painéis MDF de *Eucalyptus intertexa* sp., elevando o valor de 1369 para 1495 MPa.

3.1.4.3 Tempo

O tempo no ciclo de prensagem atua em duas etapas (tempo de fechamento da prensa e tempo de prensagem) e também sobre dois resultados (fluxo de produção e consumo de

energia), sendo que o último ainda influencia diretamente no valor final dos painéis (MENDES *et al.*, 2006).

O tempo de fechamento da prensa é estabelecido pelo ajuste da pressão inicial de prensagem e compreende o intervalo de tempo necessário para que os pratos da prensa entrem em contato com o material até que este alcance a espessura pré-estabelecida. Sendo assim, quanto maior a pressão inicial, menor será o tempo de fechamento, resultando em peças com camadas externas mais densas que as internas, pois o miolo necessita de tempos maiores para ser aquecido. Consequentemente, a região central apresentará níveis de compressão menores quando comparadas as que se encontravam em contato direto com os pratos quentes. Essa diferença apresentada é conhecida como gradiente de densidade (MENDES *et al.*, 2006).

O tempo de fechamento da prensa é fortemente influenciado pela umidade, que é responsável pela vaporização e plastização da madeira, sendo que seus diferentes níveis no colchão podem tornar a compressão mais fácil ou difícil. Visto que a plastização ocorre primeiro nas camadas externas, um fechamento rápido da prensa atribuirá ao miolo uma certa resistência a ação de pressão, sabendo-se que o mesmo ainda se encontra frio. Por outro lado, o fechamento lento exerce pouca pressão, dificultando a compressão superficial, causando densificações mais uniformes ao longo da espessura do painel (ALBUQUERQUE; IWAKIRI, 2005).

Referente à segunda variável, tempo de prensagem, esta é definida como sendo o intervalo necessário para que os pratos da prensa atinjam os espaçadores de espessura até que a mesma seja reaberta (COSTA *et al.*, 2005). O tempo atua fortemente na transferência de calor, partindo inicialmente das camadas externas em direção as internas, sempre objetivando alcançar o equilíbrio de temperatura ao longo da espessura das peças (ALMEIDA, 2006).

O tempo mínimo de prensagem (inadequado) dos painéis é afetado por diversos fatores, como: distribuição da umidade, temperatura da prensa, transferência de calor ao longo das camadas do painel e também o tempo de fechamento da prensa. Sempre é desejável que o tempo de prensagem seja reduzido devido a economia obtida com o menor gasto de energia e também o aumento de produção por unidade/tempo, entretanto, peças que não forem prensadas por um tempo adequado tem a sua resistência afetada em virtude da menor ligação interna dos painéis. Outro problema que pode vir a ocorrer é a peça apresentar uma nova expansão em espessura após a retirada da prensa devido a resina não ter atingido totalmente seu tempo de cura e a umidade ainda se encontrar em níveis elevados. Uma alternativa para reduzir o tempo de prensagem é utilizar resinas que apresentem menores tempos de cura e partículas com teor de umidade não muito elevados (ALMEIDA, 2006).

Avaliando a influência de diferentes tempos de prensagem nas propriedades tecnológicas de painéis aglomerados prensados a 180°C, Nemli (2002) percebeu melhora na ligação interna (0,16 para 0,20 N/mm²) e também no inchamento em espessura após 24 horas (11,76% para 11,16%) quando elevou-se o tempo de 135 para 150 s. Ashori e Nourbakhsh (2008) também avaliaram o efeito do tempo de prensagem na qualidade de painéis aglomerados formados por quatro espécies distintas (*Eucalyptus camaldulensis*, *Prosopis juliflora*, *Tamarix stricta* e *Phoenix dactylifera*). Os autores concluíram que o tempo de prensagem interferiu nas propriedades físicas e mecânicas, sendo que todas as mecânicas foram melhoradas quando tempo foi aumentado de quatro para cinco minutos, porque o menor tempo foi insuficiente para transferir o calor da superfície até o centro do colchão e conseqüentemente consolidá-lo.

No trabalho de Matos e Keinert (2006), que avaliaram o ciclo de prensagem para painéis *waferboards*, com diferentes tempos de prensagem (oito e dez minutos), foi observado que o maior tempo teve maior eficiência na cura da resina, e com isso menores valores de inchamento.

3.1.5 Tipos de transferência de calor

Define-se por transferência de calor a busca pelo equilíbrio térmico. Esse fenômeno ocorre através da transferência de energia de uma molécula para outra, ou de uma partícula para outra, quando as mesmas apresentam diferentes temperaturas entre si. Existem três formas pelas quais o calor pode ser transferido: condução, convecção e irradiação (AQUINO, 2014).

A condução de calor ocorre através da interação entre as moléculas, transferindo energia térmica de uma partícula mais energética para a outra menos. Um exemplo clássico da condução é aplicação calor sobre uma das pontas de uma barra de metal, a mesma irá se aquecer gradativamente até que o calor atinja a outra extremidade da barra, ficando assim todo o material aquecido (BERGMAN, *et al.*, 2014).

A radiação térmica, se baseia em ondas eletromagnéticas que se propagam através do espaço. Diferentemente da condução, a radiação se propaga no vácuo, não necessitando de um meio material nem de contato entre os corpos para que a transferência ocorra (BERGMAN, *et al.*, 2014).

A convecção pode ser definida como a movimento aleatório das moléculas que apresentam temperaturas distintas. Além disso a energia também é transferida pelo movimento global do fluido. Esse tipo de transferência é comum para gases e líquidos, como é o caso da água ao ser fervida (BERGMAN, *et al.*, 2014).

De maneira geral, a madeira não é considerada uma boa condutora térmica, entretanto, no processo de produção dos painéis, a prensagem desse material aumenta sua condução, sobretudo na movimentação do vapor aquecido (convecção) e na transferência de calor ocasionado pelo contato entre as partículas/fibras de madeira (condução) (ALBUQUERQUE, 2002).

3.1.5.1 Transferência de calor em materiais porosos

Tendo em vista que a madeira é um material poroso, ou seja, possui espaços não sólidos que permitem a permeabilidade, já que esses espaços estão preenchidos por ar e água, deve-se levar em consideração o estudo de como ocorre a transferência de calor e umidade no seu interior, devendo-se verificar de que maneira as moléculas de água interagem com o espaço poroso da madeira, além de observar como estas serão transportadas e fixadas nessa estrutura (SANTOS, 2009).

Levando-se em consideração materiais não porosos, a difusão de calor pode ser calculada a partir da lei de Fourier, que determina a transferência pura de calor por condução, entretanto, a madeira trata-se de um material poroso no qual seus espaços estão preenchidos por água e ar, visto isto, este material fica sujeito não só a gradientes de temperatura como também de umidade, de forma que esses fenômenos atuem de maneira interdependente e simultânea (SANTOS, 2009).

Diante do exposto, no balanço energético, a umidade e o calor irão interagir da seguinte maneira:

- A evaporação ou condensação da água será correspondente à quantidade de calor que um corpo irá ceder ou receber durante a alteração de seu estado físico (calor latente), enquanto condutividade e capacidade térmica serão ajustadas pelo teor de umidade (SILVA; FILHO; CRUZ, 2018);

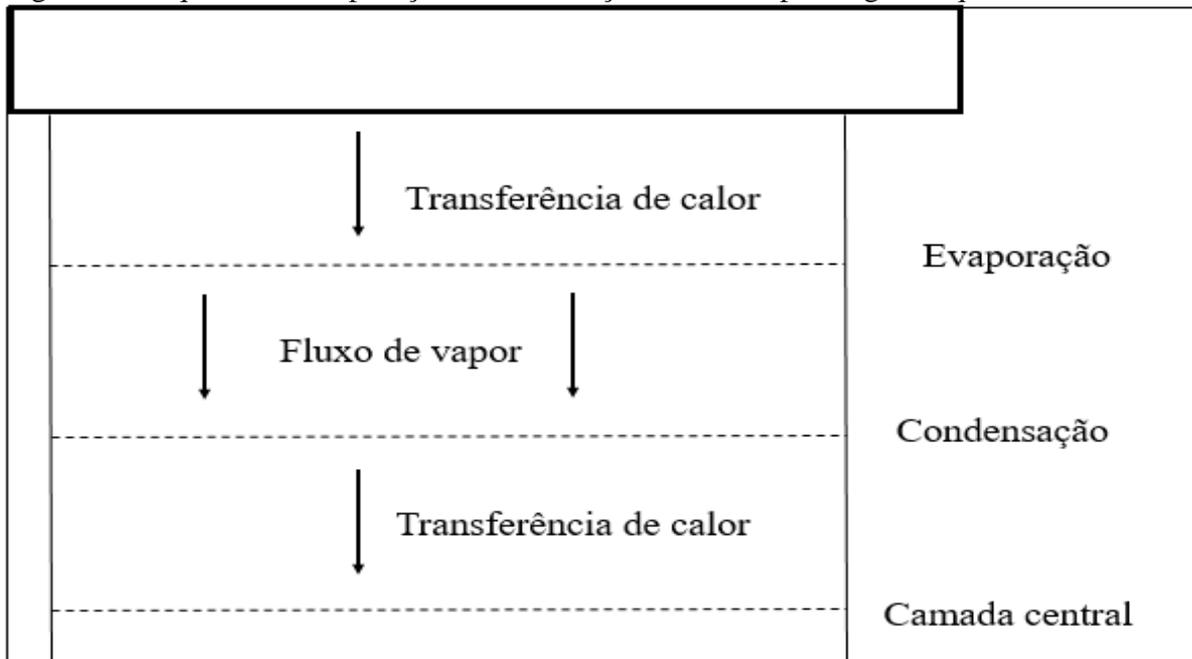
- Seguindo as mesmas primícias, o balanço de massa também depende da temperatura, já que em meios porosos, temperatura e umidade são os gradientes responsáveis pelo transporte e armazenamento de água (SILVA; FILHO; CRUZ, 2018).

Observando o contexto abordado fica nítida a importância de se conhecer o comportamento higrotérmico dos materiais porosos, como é o caso da madeira, uma vez que possibilita estimar o consumo de energia a partir da contabilização dos fluxos de energia trocados, favorecendo a aplicação de políticas de conservação (SANTOS, 2009).

3.1.5.2 Transferência de calor em painéis reconstituídos de madeira

O processo de transferência de calor e massa é iniciado no momento que os pratos da prensa tocam as superfícies do colchão, por contato (Figura 2). Por conta do aumento da temperatura nas superfícies do colchão, o conteúdo de água existente nas células ou presente na resina começam a evaporar. A evaporação da água causa primeiro um aumento de pressão nas camadas mais externas, formando um gradiente de pressão, que inicia um fluxo de vapor e calor no interior do painel. Quando o fluxo de vapor entra em contato com as camadas mais frias, parte do vapor d'água é condensado e ocorre liberação de calor. Devido ao aumento do teor de umidade, a temperatura da camada mais fria aumenta rapidamente, até o teor de umidade dessa camada atingir o máximo, o calor por condução da superfície inicia a evaporação da água. Desta forma, a evaporação e condensação gradualmente seguem para o núcleo (WEI *et al.*, 2016).

Figura 2 - Esquema da evaporação e condensação durante a prensagem a quente.



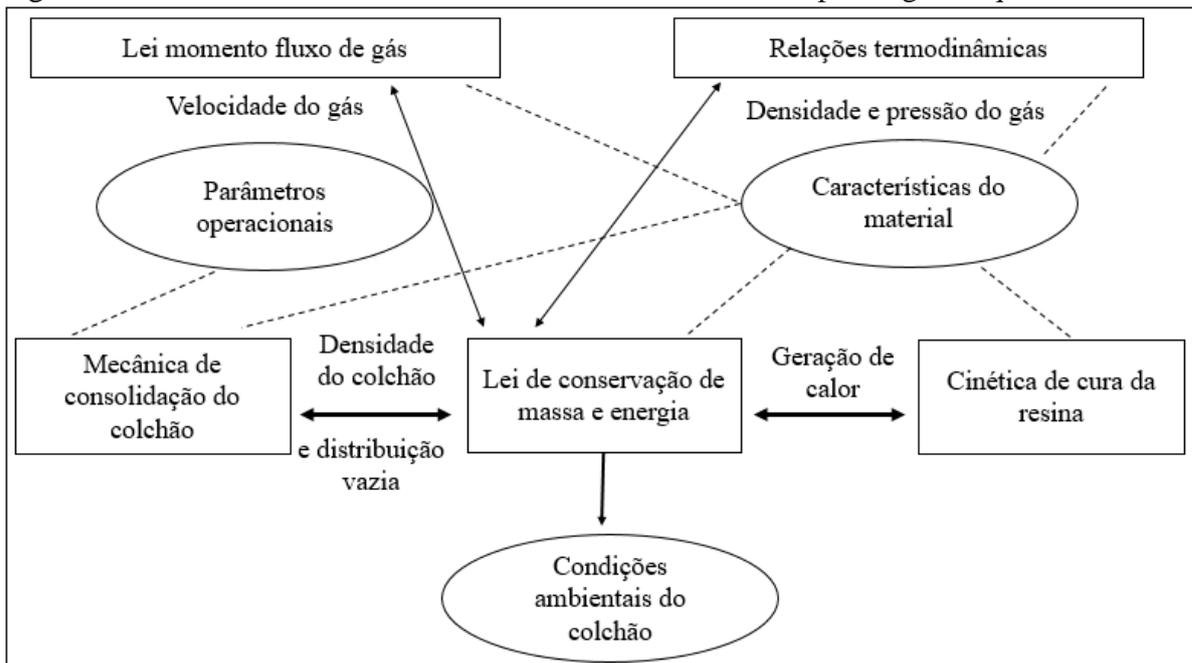
Fonte: Wei *et al.*(2016).

Vale ressaltar que o processo de prensagem a quente não é apenas um fenômeno de transferência de calor e massa, mas também, de deformação da madeira (partícula /fibra) sob altas temperaturas, além de reação química da resina. Desta forma, mudanças físicas e químicas encontram-se interligadas durante todo o processo.

Dai e Yu (2004) descreveram este processo (Figura 3) com base na lei de conservação de massa e energia para prever as condições ambientais do colchão, como temperatura e teor

de umidade. Como resultado, obtiveram que a condução e convecção de calor foram consideradas como os dois métodos mais importantes da transferência de calor, e a relação entre o fluxo de gás e a termodinâmica determinaram a velocidade e a pressão do fluxo de gás. A cura da resina também afetou a transferência de calor e massa por meio da geração ou absorção de calor (geração ou consumo de água resultante da cura da resina). Seguindo os princípios da física, as condições ambientais do colchão foram controladas externamente pelos parâmetros de operação da prensa e internamente pelas propriedades do colchão. O calor e a umidade amoleceram o material e, assim, facilitaram a densificação do colchão. Como os compostos a base de madeira são hidrofílicos e porosos, transferência de calor inevitavelmente causa o fluxo de umidade e vice-versa. Além disso, a cura da resina, embora conduzida pelas leis das reações químicas, resultou na liberação ou absorção de calor e água, o que pode ter afetado a transferência de calor e massa.

Figura 3 - Processo de transferência de calor e massa durante a prensagem a quente.



Fonte: Dai; Yu (2004).

Vários estudos reportaram a importância da transferência de calor em diversos tipos de painéis reconstituídos, como Humprey (1982) que desenvolveu o primeiro modelo matemático que objetivava descrever de que forma esse fenômeno ocorre, tendo como princípios a convecção de vapor e condução de calor. Pereira *et al.* (2004) buscaram como alternativa o aquecimento de alta frequência em painéis MDF com o intuito de reduzir o ciclo de prensagem. Para isso foi desenvolvido um modelo eletromagnético acoplado a um modelo tridimensional

de transferência de calor e massa e polimerização da resina já existente. Os autores concluíram que o modelo conseguiu prever adequadamente a evolução da temperatura interna durante a prensagem. Kavazovic *et al.* (2010) concluíram que a condutividade térmica no interior do colchão de fibras, o coeficiente de transferência de massa convectiva do limite externo e a permeabilidade do vapor tem interferência significativa na temperatura, pressão e teor de umidade do colchão durante este processo.

3.1.5.3 Métodos empregados para a medição da transferência de calor

Diante da importância que a transferência de calor exerce sobre a qualidade dos painéis de madeira reconstituída, o acompanhamento e monitoramento desse fenômeno em determinadas condições de produção, permite o desenvolvimento de ações que visam a redução do tempo e propriedades tecnológicas que atendam a norma de referência. Existem diversas maneiras de se determinar essa variável, a seguir serão apresentadas algumas delas.

Termístores são semicondutores cerâmicos que tem a sua resistência elétrica alterada termicamente, ou seja, para cada temperatura apresenta um valor de resistência elétrica distinto. Se dividem em duas categorias: termistor PTC (Coeficiente de Temperatura Positiva) que aumenta sua resistência elétrica juntamente com o aumento da temperatura e o termistor NTC (Coeficiente de Temperatura Negativa) que funciona de maneira inversa, com o aumento da temperatura sua resistência elétrica decai. A grande desvantagem desse equipamento é dificuldade de calibrar uma função entre a resistência elétrica e a temperatura (LANFREDI *et al.*, 2008).

As Termoresistências seguem o princípio dos termístores, esse equipamento permite definir uma relação entre a resistência elétrica e a temperatura de material, atingindo níveis de precisão mais elevados, sobretudo é mais sensível à erros de operação (GRANDO *et al.*, 2017).

Termômetro é um equipamento que dispõe de um laser, lente óptica e um sistema de filtro. A partir da radiação emitida pelo laser sobre um corpo é possível determinar sua temperatura em função da tensão ocasionada pela radiação (FREITAS; CARASEK; CASCUDO, 2014).

Por fim, existem os termopares que apresentam uma simplicidade de manuseio e grande confiabilidade nos resultados obtidos, são os sensores de temperatura mais utilizados. Os mesmos são constituídos por dois tipos de metais que se unem em uma das extremidades, sendo que a ocorrência de uma variação na temperatura entre a extremidade unida e a livre acarretará numa diferença de potencial que pode ser medida por um voltímetro. O conceito dos termopares

foi descoberto acidentalmente em 1822 pelo físico Tomas Seebeck ao desenvolver um experimento utilizando dois metais distintos. O termopar capacidade de ser utilizado para a determinação da temperatura de uma grande gama de materiais, inclusive painéis de madeira reconstituída (CRUZ; CHEUNG; GARCIA, 2008).

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A etapa de prensagem no processo produtivo de painéis MDF é responsável pela consolidação dos painéis em densidade e espessura, além da cura final do adesivo empregado, os quais afetam diretamente as propriedades tecnológicas dos painéis como estabilidade dimensional, resistência e rigidez.

O processo de prensagem é afetado por inúmeras variáveis, tanto inerentes as matérias-primas empregadas, quanto as variáveis de processo, o que o torna muito complexo, não sendo possível estabelecer modelos padronizados de operação.

Entre as variáveis de processo, destacam-se a densidade e a espessura dos painéis, que influenciam diretamente no tempo de prensagem. Baixos tempos de prensagem refletem em baixas densidades e altas espessuras, que comprometem as propriedades de resistência e rigidez. Tempos prolongados, prejudicam a estabilidade dimensional.

O tempo de prensagem se refere ao período necessário para que a porção central do painel atinja a temperatura de cura, o que envolve fenômenos físicos, químicos e mecânicos como a transferência de massa e calor por condução e convecção, além da reação de polimerização do adesivo.

O estudo da transferência de calor na etapa de prensagem é primordial para se conhecer o tempo de polimerização do adesivo, principalmente na porção central, última camada a obter a cura, permitindo desta forma, a redução de custo, o aumento de produtividade na linha produção e o atendimento aos valores de referência estabelecidos pelas normas de qualidade, que é desejado industrialmente.

Como não existem modelos padronizados para estabelecimento dos tempos de prensagem, faz-se necessário a realização de ensaios periódicos, os quais podem ser realizados com equipamento simples e eficazes como os termopares.

REFERÊNCIAS

- AKGUL, M.; ÇOPUR, Y.; GULER, C.; TOZLUOGLU, A.; BUYUKSARI, U. Medium density fiberboard from *Quercus robur*. **Journal of Applied Sciences**, v. 7, n. 7, p. 1085-1087, 2007.
- ALBUQUERQUE, C.E.C. **Interações de variáveis no ciclo de prensagem de aglomerados**. 2002. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) – Centro de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2002.
- ALBUQUERQUE, C. E. C.; IWAKIRI, S. Efeito da adição de água na evolução da temperatura no miolo de aglomerados durante o ciclo de prensagem. **Floresta**, v.35, n. 1, p. 57-67, 2005.
- ALMEIDA, P. C. O. R. **Estudo da influência da temperatura e do tempo de prensagem nas características físico-mecânicas, de diferentes tipos de MDF aquando do seu revestimento por prensagem**. 2006. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais Lenhocelulósicos) - Instituto Superior de Agronomia, Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa, 2006.
- AQUINO, J. A. **Análise e aperfeiçoamento de um Aparato experimental para a determinação da condutividade térmica de materiais metálicos sólidos**. 2014. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Energia) – Faculdade de Engenharia da Energia, Universidade Federal de São João Del-Rei, São João Del-Rei, 2014.
- ASHORI, A.; NOURBAKHSB, A. Effect of press cycle time and resin content on physical and mechanical properties of particleboard panels made from the underutilized low-quality raw materials. **Industrial crops products**, v.28, p. 225-230, 2008.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 15316-2:2019**: Painéis de fibras de média densidade Parte 2: Requisitos e métodos de ensaio. Rio de Janeiro, 2019. 95 p.
- 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**, v. 20, n. 3, p. 493-500, 2010.
- BELINI, U. L.; TOMAZELLO FILHO, M.; CHAGAS, M. P. Densitometria de raios X aplicada na avaliação tecnológica de painéis MDF de eucalipto. **Scientia Forestalis**, v. 37, n. 84, p. 343-350, 2009.
- BERGMAN, T.L.; LEVINE, A.S.; INCROPERA, F.P.; DEWITT, D.P. **Fundamentos de transferência de calor e de massa**. 7. Ed. Rio de Janeiro: LTC, 2014.
- BOM, R. P. **Processo produtivo de painéis MDF**. Centro Universitário de União da Vitória, União da Vitória, 2008.
- BRASIL, A. A.; ANGELO, H.; SANTOS, A. J.; BERGER, R.; SILVA, J. C. G. L. Demanda de exportações de painéis de madeira do Brasil. **Floresta**, v. 33, n. 2, p. 135-146, 2003.

BUTTERFIELD, B.; CHAPMAN, K.; CHRISTIEL, L.; DICKSON, A. Ultra structural characteristics of failures surfaces in medium density fiberboard. **Forest Products Journal**, v.42. n.5, p.55-60, 1992.

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

CAMPOS, C. I. MDF: Processo produtivo de chapa de fibras de média densidade (MDF). **Revista da Madeira**. Ed. 71, 2003.

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

CAMPOS, C. I.; LAHR, F. A. R. MDF: processo de produção, propriedades e aplicações. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA E CIÊNCIA DOS MATERIAIS, 2002, Natal. **Anais**. Natal: UFRN, 2002. p. 2054-2059.

CARVALHO, L. M. H. **Estudo da operação de prensagem do aglomerado de fibra de média densidade (MDF): prensa descontínua de pratos quentes**. 1999. Tese (Doutorado em Engenharia Química) - Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, 1999.

COSTA, L. P. E.; HASELEIN, C. R.; SANTINI, E. J.; SCHNEIDER, P. R.; CALEGARI, L. Qualidade das chapas de partículas aglomeradas fabricadas com resíduos do processamento mecânico da madeira de *Pinus elliottii* Engelm. **Ciência Florestal**, v. 15, n. 3, p. 311-322, 2005.

CRISTESCU, C.; SANDBERG, D.; EKEVAD, M.; KARLSSON, O. Influence of pressing parameters on mechanical and physical properties of self-bonded laminated beech boards. **Wood Material Science and Engineering**, v. 10, n. 2, p. 205-214, 2015.

CRUZ, K. A. S.; CHEUNG, N.; GARCIA, A. Parâmetros térmicos, macroestrutura e microestrutura na solidificação direcional da liga Al-20%Sn. **Tecnologia em Metalurgia e Materiais**, v.4, n.4, p. 21-26, 2008.

CYR, P. L.; RIEDL, B.; WANG, X. M.; SHALER, S. Urea-melamineformaldehyde (UMF) resin penetration in medium-density fiberboard (MDF) wood fibers. **Journal Adhesion Science Technology**, p. 787–801, 2006.

DAI, C.; YU, C. Heat and mass transfer in wood composite panels during hot-pressing: Part I. A physical–mathematical model. **Wood Fiber Scientia**. v. 36, n.34, p. 585–597, 2004.

DUNKY, M. Urea-formaldehyde (UF) adhesive resins for wood. **International Journal Adhesion Adhesives**, p. 95–107, 1998.

ELEOTÉRIO, J. R. **Propriedades físicas e mecânicas de painéis MDF de diferentes densidades e teores de resina**. 2000. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Faculdade de Ciência e Tecnologia de Madeiras, Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Botucatu, 2000.

ELEOTÉRIO, J. R.; FILHO, M. T.; JÚNIOR, G. B. Propriedades físicas e mecânicas de painéis MDF de diferentes massas específicas e teores de resina. **Ciência Florestal**, v. 10, n. 2, p. 75-90, 2000.

EUGÊNIO, R. A. P. **Painéis de *Medium Density Fiberboard* produzidos com adesivo alternativo**. 2016. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Bauru, 2016.

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

FRANÇA, M. C. **Produção de painéis aglomerados de fibras oversize de uma indústria de MDF**. 2015. Dissertação (Mestrado) – Curso de Pós-graduação em Engenharia Florestal, Centro de Ciências Agroveterinárias, Universidade do Estado de Santa Catarina, Lages, 2015.

FREITAS, J. G.; CARASEK, H.; CASCUDO, O. Utilização de termografia infravermelha para avaliação de fissuras em fachadas com revestimento de argamassa e pintura. **Ambiente Construído**, v. 14, n. 1, p. 57-73, 2014.

MATTOS, R. L. G.; GONÇALVES, R. M.; CHAGAS F. B. Painéis de Madeira no Brasil: Panorama e Perspectivas, BNDES Setorial, Rio de Janeiro, n. 27, p. 121-156, mar. 2008.

GRANDO, F. L.; DENARDIN, G. W.; MACHADO, M.; VARGAS, N. S. Sistema de aquisição de dados para aquecedores solares. **Revista Brasileira de Energia Solar**, v. 8, n. 1, p. 34-41, 2017.

GRUBERT, W. **Utilização de partículas de bambu (*Phyllostachys edulis* e *Phyllostachys bambusoides*) como reforço em compósito de madeira**. 2016. Dissertação (Mestrado) – Curso de Pós-graduação em Engenharia Florestal, Centro de Ciências Agroveterinárias, Universidade do Estado de Santa Catarina, Lages, 2016.

GUL, W.; KHAN, A.; SHAKOOR, A. Impact of Hot Pressing Temperature on Medium Density Fiberboard (MDF) Performance. **Advances in Materials Science and Engineering**, v. 2017, n. 1, p. 1-6, 2017.

HUMPHREY, P. E. Physical aspects of wood particle board manufacture. PhD Thesis. University College of North Wales, Bangor, UK, 1982.

INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES. Relatório Anual 2019. **IBÁ. 2019**

KARGARFARD, A.; NOURBAKHS, A.; HAJIHASSANI, R. The effect of press temperature and press time on Medium Density Fiberboard (MDF) properties produced from *Eucalyptus intertexta* fibers. **Iranian Journal of Wood Paper Science Research**. v. 24, n. 1, p. 26-35, 2009.

KAVAZOVIC, Z.; DETEIX, J.; CLOUTIER, A.; FORTIN, A. Sensitivity study of a numerical model of heat mass transfer involved during the medium density fiberboard hot pressing process. **Wood and Fiber Science**, v. 42, n. 2, p. 130-149, 2010.

- 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, p. 66, 1977.
- LIU, Y. Q.; TIAN, Y.; ZHAO, G.Z.; SUN, Y. Y.; ZHU, F.T.; CAO, YANG. Synthesis of urea-formaldehyde resin by melt condensation polymerization. **Journal of Polymer Research**. v.15, p. 501-505, 2008.
- LANFREDI, S.; GROSSO, R. L.; ANTUNES, A. C.; NOBRE, M. A. L. Comportamento elétrico a alta temperatura de termistor cerâmico alfa-Fe₂O₃ com coeficiente de temperatura negativo. **Cerâmica**, v. 54, p. 443-450, 2008.
- LOPES, H. F.; MACHADO, M. S. **Estudo de viabilidade econômico-financeira de unidade de fabricação de “MDF – Medium Density Fiberboard”**. Polo de Excelência em Florestas, Governo de Minas, Viçosa, 2013.
- MALONEY, T. M. **Modern particleboard and dry process fiberboard manufacturing**. Miler Freeman Publications, São Francisco, 1977.
- MATOS, J. L. M. **Ciclo da prensa em chapas de partículas estruturais “waferboards”**. 1988. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Faculdade de Engenharia Florestal, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 1988.
- MATOS, J.L.M.; KEINERT Jr., S. Estudo do ciclo da prensa para produção de painéis *waferboard*. **Floresta**. p. 72-78. 2006.
- MELO, R. R.; MENEZZI, C. H. S. Influência da massa específica nas propriedades físico-mecânicas de painéis aglomerados. **Silva Lusitana**, n. 18, p. 59-73, 2010.
- MENDES, R. F. **Efeito do tratamento térmico sobre as propriedades de painéis OSB**. 2010. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Faculdade de Recursos Florestais, Universidade de São Paulo, Escola Superior de Agricultura “Luiz Queiroz”, Piracicaba, 2010.
- MENDES, L. M.; SILVA, G. A.; TRUGILHO, P. F.; SALDANHA, L. K.; MORI, F. A.; PÁDUA, A. F. Influência do teor de resina, temperatura e tempo de prensagem na umidade de equilíbrio de painéis de partículas de madeira. **Cerne**, v. 12, n. 4, p. 329-335, 2006.
- MINOPOULOU, E.; DESSIPRI, E.; CHRYSSIKOS, G. D.; GIONIS, V.; PAIPETIS, A. Use of NIR for structural characterization of ureaformaldehyde resins. **International Journal Adhesion Adhesives**, v. p. 473–484, 2003.
- NEMLI, G. Factors affecting the production of E1 type particleboard. **Turkish Journal of Agriculture and Forestry**. v. 26, p. 31-36, 2002.
- PAES, J. B.; NUNES, S. T.; LAHR, F. A. R.; NASCIMENTO, M. F.; LACERDA, R. M. A. Qualidade de chapas de *Pinus elliottii* coladas com resina poliuretana sob diferentes combinações de pressão e temperatura. **Ciência Florestal**, v. 21, n. 3, p. 551-558, 2011.
- PAZETTO, V. M. F.; DELMENEZZI, C. H. S.; GONÇALEZ, J. C. Efeito da espessura e do vão na deformação em flexão estática de painéis de madeira. **Cerne**, v. 21, n. 4, p. 617-624, 2015.

PEREIRA, C.; BLANCHARD, C.; CARVALHO, L.; COSTA, C. High frequency heating of medium density fiberboard (MDF): Theory and experiment. **Chemical Engineering Science**, v. 59 n.4, p. 735–745, 2004.

RANITA, J.; MARTINS, J.; GARRIDO, N.; CARVALHO, L.; COSTA, C. Influência do ciclo de prensagem na qualidade do aglomerado de partículas de madeira fabricado com um teor elevado de partículas recicladas. In: CONGRESSO FLORESTA NACIONAL: A FLORESTA E AS GENTES, 5., 2005, Viseu.

ROFII, M. N.; KUBOTA, S.; KOBORI, H.; KOJIMA, Y. Furnish type and density effects on temperature and vapor pressure of wood-based panels during hot pressing. **Journal of Wood Science**, v. 62, p. 168-173, 2016.

ROFII, M. N.; YAMAMOTO, N.; UEDA, S.; KOJIMA, Y.; SUZUKI, S. The temperature behaviour inside the mat of wood-based panel during hot pressing under various manufacturing conditions. **Journal of Wood Science**, v. 60, p. 414-420, 2014.

SALDANHA, L. K.; IWAKIRI, S. Influência da densidade e do tipo de resina nas propriedades tecnológicas de painéis OSB de *Pinus taeda* L. **Floresta**, v. 39, n. 3, p. 571-576, 2009.

SANTOS, G. H. **Transferência de calor, ar e umidade através de elementos porosos de edificações**. 2009. Tese (Doutorado em Engenharia) – Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2009.

SETTER, C.; MELO, R.R.; STANGERLIN, D. M. Propriedade físicas e mecânicas de painéis aglomerados e de fibras de média densidade. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA MADEIRA, 3., 2017, Florianópolis. **Anais**. Florianópolis: UDESC, 2017.

SILVA, R. L.; FILHO, J. V. F.; CRUZ, C. C. S. Simulação numérica da transferência de calor na madeira Gombeira. **Mundi**, v. 3, n. 2, p. 1-15, 2018.

SOUSA, D. A. **Determinação de tensões residuais em materiais metálicos por meio de ensaio de dureza**. 2012. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de São João Del-Rei, São João Del-Rei, 2012.

TORQUATO, L. P. **Caracterização dos Painéis MDF comerciais produzidos no Brasil**. 2008. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Curso de Pós-graduação em Engenharia Florestal, setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2008.

WEBER, C. **Estudos sobre viabilidade de uso de resíduos de compensados, MDF e MDP para produção de painéis aglomerados**. 2011. Dissertação (Mestrado) – Curso de Pós-graduação em Engenharia Florestal, setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2011.

WEBER, C.; IWAKIRI, S. Utilização de resíduos de compensados, MDF e MDP para produção de painéis aglomerados. **Ciência Florestal**, v. 25, n. 2, p. 405-413, 2015.

WEI, P.; RAO, X.; YANG, J.; GUO, Y.; CHEN, H.; ZHANG, Y.; CHEN, S.; DENG, X.; WANG, Z. Hot Pressing of Wood-Based Composites: A Review. **Forest Products Journal**, v. 66, n. 7/8, p. 419-427, 2016.

CAPÍTULO II – AVALIAÇÃO DO PROCESSO DE Prensagem DE Painéis MDF

1 INTRODUÇÃO

Na área florestal, um dos setores que merece destaque em função da matéria-prima utilizada e da tecnologia empregada é o de painéis de madeira reconstituída, que envolve painéis particulados como MDP (*Medium Density Particleboard*), conhecido popularmente como aglomerados e OSB (*Oriented Strand Board*); e painéis fibrosos, onde se destacam o MDF (*Medium Density Fiberboard*) e o HDF (*High Density Fiberboard*).

Os painéis MDF, que surgiram em meados de 1960, são fabricados pela aglutinação de fibras de madeira com resinas sintéticas e ação conjunta de temperatura e pressão. É considerado um produto versátil, com maior resistência ao fogo quando se associa algum tipo de retardante de chamas e permite aproveitamento integral do fuste. Entre suas propriedades destacam-se: estabilidade dimensional, homogeneidade, superfície plana e lisa, ótima usabilidade para encaixar, entalhar, cortar, parafusar, perfurar e moldurar, além de reduzir o uso de tintas, vernizes e ótima aceitação de revestimentos. É um produto consolidado na indústria moveleira mundial, com ampla inserção na construção civil, e vem sendo empregado em vários outros setores industriais (CAMPOS; LAHR, 2002).

Na produção dos painéis, a prensagem pode ser considerada uma das etapas principais, em função de realizar a consolidação do colchão por meio da definição da espessura, a cura do adesivo e a migração da umidade na forma de vapor pelas bordas do painel. Devido aos altos custos dessa etapa, é sempre preferível que o tempo de prensagem seja o menor possível, entretanto, deve ser adequado para que as resinas atinjam a cura e as propriedades tecnológicas dos painéis não sejam afetadas. Diversos fatores como espécie de madeira, geometria das partículas / fibras, tipo de resina e sua catálise, teor de umidade do colchão, temperatura, tempo de fechamento da prensa, eficácia da transferência de calor, densidade e espessura do painel influenciam sobre esse intervalo, podendo torná-lo mais curto ou longo (LIMA *et al.*, 2018; MALONEY, 1993). Na prensagem, cada um destes fatores interage, dificultando o uso de fórmulas fáceis quando se trata de prensagem a quente.

Avaliar e monitorar a transferência de calor no interior do painel permite entender de que forma esse fenômeno ocorre, além de determinar o tempo necessário para a camada central atingir a temperatura de cura do adesivo. Existem algumas formas de realizar esse monitoramento, uma das mais comuns é a utilização de termopares nas superfícies e no miolo, equipamento que realiza a medição durante a prensagem quando conectado a um módulo

transmissor (CRUZ; CHEUNG; GARCIA, 2008). Vários estudos, utilizaram com êxito os termopares, como os de Kamke e Casey (1988), Steffen *et al.* (1999), Pichelin *et al.* (2001), Silva (2018) e Iwakiri *et al.* (2019).

Estudos que buscam entender de que forma ocorre essa transferência de calor ao longo da espessura, vem sendo desenvolvidos nos mais variados tipos de painéis de madeira reconstituída como Pichelin *et al.* (2001) que estudaram os mecanismos de transferência de calor e os parâmetros de pressão durante a prensagem a quente em painéis particulados com alto teor de umidade, Kavazovic *et al.* (2010) que analisaram o impacto da variabilidade das propriedades de transferência de calor e umidade em painéis MDF e Rofii *et al.* (2016) que abordaram o efeito da matéria-prima e da densidade na temperatura e pressão de vapor no interior de painéis particulados.

Com o propósito de analisar essa perspectiva, o objetivo deste capítulo foi avaliar o processo de prensagem de painéis de fibras de média densidade (MDF) com diferentes densidades (650 kg.m^{-3} e 750 kg.m^{-3}) e espessuras (15 mm e 18 mm), com o intuito de estabelecer o tempo para atingir a temperatura de cura da resina no centro do painel (100°C) e verificar o comportamento da temperatura neste ponto e nos minutos seguintes.

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Matéria-prima

Na produção dos painéis, foram utilizadas fibras de *Pinus taeda* L. com densidade de 399 kg.m^{-3} , provenientes do processo produtivo de MDF da Empresa Sudati – Unidade de Otacílio Costa, as quais foram retiradas após o processo de desfibramento termomecânico; resina uréia-formaldeído e emulsão de parafina, fornecidas pela mesma empresa. A resina apresentava, conforme boletim técnico da empresa, 1,08 de razão molar, 220 cP de viscosidade, 60% de teor de sólidos, 75-80 segundos de gel time e 7,6 de pH; e a emulsão de parafina 58,3 % de teor de sólidos, 20-25 segundos de gel time e pH igual a 8,9.

2.2 Plano experimental

Foram produzidos 12 painéis, divididos em 4 tratamentos com 3 repetições cada. Os tratamentos foram caracterizados por duas densidades, 650 kg.m^{-3} e 750 kg.m^{-3} , e duas espessuras, 15 mm e 18 mm, 12% de resina ureia formaldeído, 1% de emulsão de parafina com base no peso seco das fibras e ciclo de prensagem com 35 kgf.cm^{-2} de pressão, temperatura dos pratos da prensa de 170°C , por um tempo até a temperatura atingir 100°C no centro do painel mais doze minutos. A tabela 1 apresenta o plano experimental.

Tabela 1- Plano experimental para avaliação do tempo de prensagem.

Tratamento	Densidade (kg.m^{-3})	Espessura (mm)	Tempo de prensagem (s)
T1 _(650;15)	650	15	$100^\circ\text{C} + 720$ segundos
T2 _(650;18)	650	18	$100^\circ\text{C} + 720$ segundos
T3 _(750;15)	750	15	$100^\circ\text{C} + 720$ segundos
T4 _(750;18)	750	18	$100^\circ\text{C} + 720$ segundos

Legenda: valores entre parênteses se referem a densidade em kg.m^{-3} e espessura em mm. Fonte: elaborado pelo autor (2020).

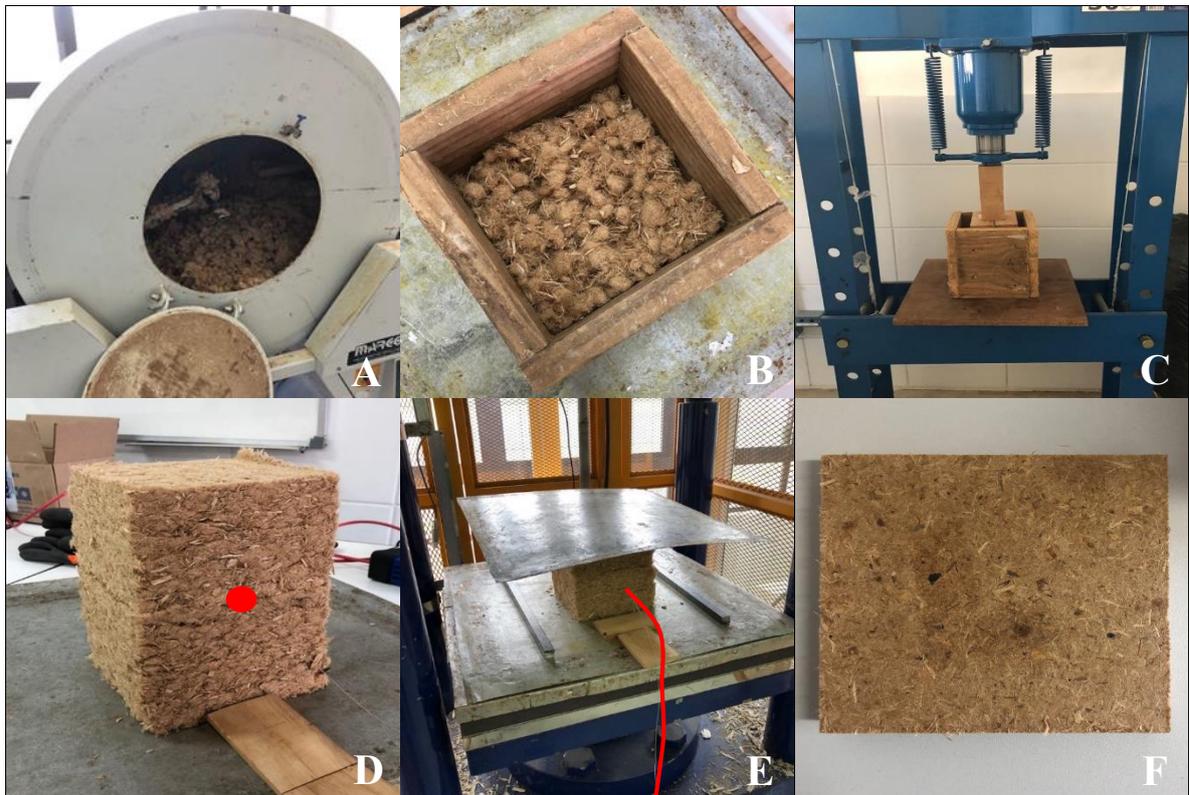
2.3 Produção dos painéis para avaliação do tempo de prensagem

O único tratamento aplicado as fibras antes da produção dos painéis foi a secagem, realizada em uma estufa com circulação forçada de ar a temperatura de 80°C , até o material

atingir 4+/-1% de umidade. O controle do teor de umidade foi realizado diariamente por meio de uma balança com medidor infravermelho.

A produção dos painéis (Figura 4) envolveu a aplicação da resina e da parafina de forma independente sobre as fibras em um tambor rotativo, dotado de uma pistola pulverizadora localizada no centro do tambor, a qual era acionada por um compressor de ar. Formada a massa de fibras, resina e parafina, em quantidade pré calculada, foi colocada em uma caixa formadora com dimensões internas de 15 x 15 cm. Posteriormente, o colchão com o termopar fixado no meio da porção central, foi pré-prensado em temperatura ambiente sob pressão de 5 kgf.cm⁻² por 10 minutos para reduzir a espessura e efetivar as primeiras fases do processo de adesão (fluidez, transferência e penetração parcial). A prensagem a quente foi realizada em uma prensa hidráulica Marconi MA 098, na qual foi aplicado o ciclo de prensagem apresentado no plano experimental.

Figura 4 – Produção dos painéis 15x15 cm. (A) Encoladeira com a massa de fibras; (B) caixa formadora com a massa de fibras; (C) prensagem à frio; (D) colchão com termopar na camada central; (E) fechamento dos pratos da prensa; (F) painel formado.



Fonte: elaborado pelo autor (2020).

O termopar tipo K fixado na porção central do colchão foi conectado ao módulo HBM modelo Quantum X - MX1609KB, que era responsável pela medição da temperatura com

exatidão de até $\pm 0,1$ °C. O módulo, por sua vez, estava conectado ao notebook, que por meio do programa Catmam, apresentava em tempo real, a ascensão da temperatura a cada 0,1 segundo.

2.4 Análise dos dados

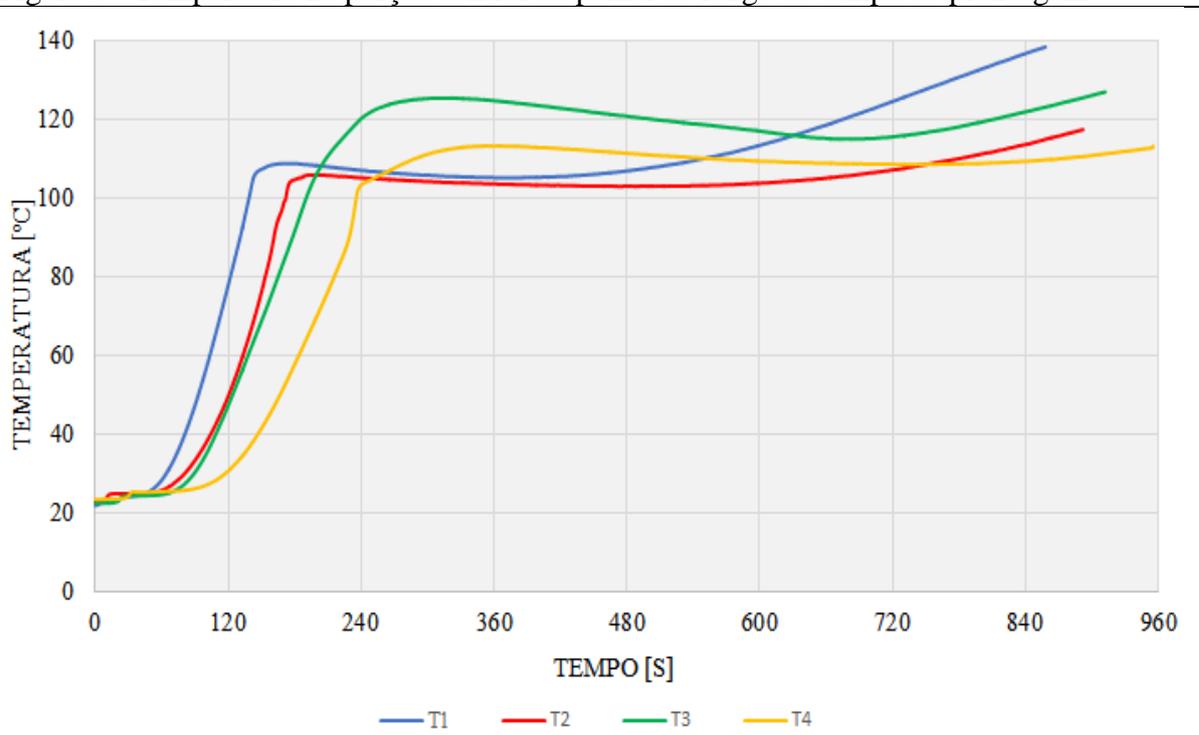
Os valores de temperatura no centro do painel ao longo do tempo de prensagem foram apresentados por meio de gráficos e analisados de forma descritiva. Os tempos e temperaturas finais de cada fase, foram submetidos a verificação de normalidade dos dados e homogeneidade das variâncias pelos Testes de Shapiro Wilk e Bartlett, respectivamente. Posteriormente, foi aplicada a Análise de Variância, e quando necessário, Teste de Scott – Knott com 5% probabilidade de erro.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Comportamento da temperatura em função do tempo de prensagem

A figura 5 apresenta o comportamento da temperatura em função do tempo de prensagem para os quatro tratamentos, na qual é possível observar cinco fases distintas, sendo a primeira caracterizada pela estabilização da temperatura, a segunda pela elevação acentuada, a terceira pela continuidade do crescimento em menor velocidade, a quarta pela redução em alguns poucos graus, mas por um longo período de tempo e a quinta pelo retorno de elevação da temperatura.

Figura 5 - Temperatura na porção central do painel ao longo do tempo de prensagem



Legenda: T1 (650 kg.m^{-3} , 15 mm); T2 (650 kg.m^{-3} , 18 mm); T3 (750 kg.m^{-3} , 15 mm); T4 (750 kg.m^{-3} , 18 mm).
Fonte: elaborado pelo autor (2020).

O término de cada fase foi determinado de forma visual, como segue:

- Primeira fase: fim da estabilização e ascensão acentuada da temperatura;
- Segunda fase: desaceleração da ascensão acentuada da temperatura;
- Terceira fase: início da redução da temperatura;
- Quarta fase: retorno da ascensão da temperatura;
- Quinta fase: término da prensagem.

Foi observada diferença estatística entre os tratamentos tanto para tempo de prensagem quanto para temperatura, exceto na primeira fase (tabela 2 e 3).

Conforme figura 5 e tabelas 2 e 3, a primeira fase inicia com a temperatura da porção central do painel em torno de 23°C, a qual permanece por 60 segundos para os tratamentos T1, T2, T3 e por 88 segundos para T4 que é formado por painéis de maior densidade (750 kg.m⁻³) e espessura (18 mm), o que possivelmente contribuiu para esse tempo mais prolongado. A variação de temperatura média obtida para todos os tratamentos nesta fase foi de 3,6°C e duração média de 67 segundos. Carvalho, Costa e Costa (2003), encontraram tempo idêntico ao T4 para painéis MDF com características semelhantes.

Nesta fase, a transferência de calor por condução é iniciada no momento em que os pratos quentes tocam as superfícies do colchão, devido a diferença de temperatura dos materiais. As superfícies alcançam rapidamente a temperatura de evaporação da água, o que provoca a redução do seu teor de umidade. A partir desse momento, forma-se um gradiente de pressão que conduz o vapor de água da superfície para o miolo do painel (ZOMBORI, 2001). Portanto, o crescimento limitado dessa fase pode ser explicado pelo tempo necessário para que ocorra esse transporte de massa da superfície em direção ao interior.

Tabela 2 -Tempo final e duração de todas as fases de prensagem.

Tratamento	Tempo final de cada fase da prensagem (s)				
	1 ^a	2 ^a	3 ^a	4 ^a	5 ^a
T1 _(650;15)	60 ₍₆₀₎ A	144 ₍₈₄₎ A	182 ₍₃₈₎ A	378 ₍₁₉₆₎ A	854 ₍₄₇₆₎ A
T2 _(650;18)	60 ₍₆₀₎ A	181 ₍₁₂₁₎ B	207 ₍₂₆₎ A	474 ₍₂₆₇₎ B	888 ₍₄₁₄₎ B
T3 _(750;15)	60 ₍₆₀₎ A	276 ₍₂₁₆₎ D	324 ₍₄₈₎ B	692 ₍₃₆₈₎ C	912 ₍₂₂₀₎ C
T4 _(750;18)	88 ₍₈₈₎ A	243 ₍₁₅₅₎ C	374 ₍₁₃₁₎ C	758 ₍₃₈₄₎ D	952 ₍₁₉₄₎ D
Média	67 ₍₆₇₎	211 ₍₁₄₄₎	272 ₍₆₁₎	576 ₍₃₀₄₎	902 ₍₃₂₆₎

Legenda: valores entre parênteses se referem ao tempo de duração de cada uma das fases de prensagem. Médias seguidas de mesma letra na coluna não diferem estatisticamente entre si pelo Teste de Scott-Knott a 5% de probabilidade de erro. Fonte: elaborado pelo autor (2020).

Tabela 3 - Temperatura final e variação de temperatura em todas as fases de prensagem

Tratamento	Temperatura atingida no final de cada fase da prensagem (°C)				
	1 ^a	2 ^a	3 ^a	4 ^a	5 ^a
T1 _(650;15)	28,4 _(6,5) A	106,1 _(77,7) A	108,9 _(2,8) A	105,3 _(-3,6) A	138,4 _(33,1) C
T2 _(650;18)	25,7 _(2,9) A	104,9 _(79,2) A	106,0 _(1,1) A	103,1 _(-2,9) A	117,6 _(14,5) A
T3 _(750;15)	24,6 _(2,2) A	124,7 _(100,1) B	125,6 _(0,9) C	115,2 _(-10,4) C	127,2 _(12,0) B
T4 _(750;18)	26,9 _(3,5) A	104,0 _(77,1) A	113,4 _(9,4) B	108,7 _(-4,7) B	113,4 _(4,7) A
Média	26,4 _(3,8)	109,9 _(83,5)	113,5 _(3,6)	108,1 _(-5,4)	124,2 _(16,1)

Legenda: valores entre parênteses referem-se a variação de temperatura em cada fase da prensagem (°C). Médias seguidas de mesma letra na coluna não diferem estatisticamente entre si pelo Teste de Scott-Knott a 5% de probabilidade de erro. Fonte: elaborado pelo autor (2020).

A segunda fase se destacou pela aceleração da transferência de calor em virtude da intensificação do gradiente de pressão que começou na fase anterior e, o consequente aumento da temperatura na porção central. Nela foi verificada as maiores variações de temperatura. Observa-se que o tratamento que obteve a maior ascensão de temperatura nesta fase foi o T3 com 100,1°C e o menor o T4 com 77,1°C.

Nesta fase, a porção central dos painéis de todos os tratamentos atingiram 100°C, que é a temperatura de cura do adesivo. Esta temperatura foi atingida em 138s, 172s, 192s e 235s, para os tratamentos T1, T2, T3 e T4, respectivamente. Nota-se que após as porções centrais chegarem em 100°C, as temperaturas continuaram a subir por mais um tempo, até temperaturas de 106,1°C, 104,9°C, 124,7°C e 104,0°C para os tratamentos T1, T2, T3 e T4, respectivamente. Outro ponto importante a ser destacado, é o maior tempo dos painéis de maior densidade para atingir a temperatura de cura na porção central. De acordo Albuquerque (2002) isso ocorre porque os painéis com maior densidade possuem menos espaços internos, o que dificulta o deslocamento dos vapores aquecidos, além também da maior quantidade de material a ser aquecido.

Gupta *et al.* (2006) produzindo painéis MDF com 13 mm de espessura, 650 kg.m⁻³ de densidade, prensados a 180° C e teor de umidade das fibras a 10,5%, verificaram o alcance de 100°C no centro a aproximadamente 118 segundos, tempo que foi inferior ao verificado no T1 (650 kg.m³ e 15 mm). Dois fatores podem ter contribuído para uma transferência de calor mais acelerada. Primeiro, a menor espessura e segundo o maior teor de umidade das fibras. Cai, Muehl e Winandy (2006) explicam que o teor de umidade do colchão é um dos principais

parâmetros que afeta a pressão máxima alcançada durante a prensagem, visto que maior teor de umidade produzirá mais vapor, que aumentará a pressão interna e por isso favorecerá a propagação de calor.

Silva (2018) trabalhando com painéis MDF, encontrou um tempo de 174 segundos para atingir 100°C no centro do painel de densidade 749 kg.m⁻³ e 13 mm de espessura, o qual foi próximo ao verificado no tratamento T3, embora exista diferença de espessura, o que possivelmente favoreceu o alcance de 100°C no centro 18 segundos antes do T3. A diferença de espessura também resultou em diferentes temperaturas máximas, 148,9°C para Silva (2018) e 127,2°C no tratamento T3 do presente estudo.

Carvalho, Costa e Costa (2003) trabalhando com painéis MDF com 19 mm de espessura e densidade de 750 Kg.m⁻³, características próximas ao tratamento T4, encontraram 220 segundos para alcançar 100°C no centro do painel, resultado relativamente semelhante ao deste estudo. Fatores como a temperatura de prensagem (190°C) e o teor de umidade do colchão (11%) podem ter contribuído para uma transferência de calor mais rápida.

Entretanto, vale mencionar que teores de umidade muito elevados resultam no estouro/delaminação dos painéis. A ligação interna entre as fibras ocorre quando a resina é curada. No entanto, esta cura não é totalmente efetivada durante o ciclo de prensagem, assim a pressão residual do vapor interno excede a resistência de ligação interna ainda em desenvolvimento, o que causa a delaminação da placa, assim que a pressão é liberada. Este resultado foi observado em painéis MDF com teor de umidade superior a 15,5% (CAI; MUEHL; WINANDY, 2006).

A terceira fase foi marcada pela redução da velocidade de ascensão da temperatura na porção central, obtendo a terceira menor média de ascensão de temperatura (3,6°C). Este fato está estritamente associado a redução da taxa de transferência de energia, a qual ocorre devido alguns fatores, elencados por Bolton *et al.* (1989), como o aumento da pressão interna que propicia a elevação da perda de vapor; a redução do gradiente de temperatura entre a superfície e o centro, tendo em vista que na fase anterior os valores apresentavam tendência de aproximação; o aumento do calor latente nas superfícies do colchão devido a redução do teor de umidade e o inverso no miolo; e com aumento do teor de umidade reduziu-se o calor latente. Durante essa fase, o tratamento T3 apresentou o menor período de tempo e, conseqüentemente a menor ascensão de temperatura (0,9°C) e o T4 o maior tempo e maior ascensão de temperatura (9,4°C).

A quarta fase é definida por Zombori (2001) como *plateau*. Nela não ocorre o aumento de temperatura, pelo contrário, redução de forma lenta e progressiva, ficando por diversos

momentos inalterada. No entanto, o autor não constatou redução de temperatura, apenas a sua estabilização. Para o tratamento T1, essa fase iniciou em 183 s e prolongou-se até 378 s, registrando nesse período uma perda de temperatura de 3,6°C; o T2 teve declínio de 208 a 474 s, contabilizando uma queda de 2,9°C, que foi a menor entre todos os tratamentos; o T3 obteve o maior, iniciando em 325 segundos e finalizando em 692 segundos com 10,4°C a menos; e o T4 teve como intervalo de 375 a 758 segundos, o que resultou em uma diminuição de 4,7°C. Isso ocorreu devido a taxa de produção de vapor das camadas mais próximas dos pratos tornarem-se menores que as perdas para o ambiente, situação essa que se manteve por vários minutos, tornando-a consideravelmente longa.

Roffi *et al.* (2014) denomina esta como a fase de vaporização, onde a temperatura se mantém constante no miolo do painel, devido ao processo de vaporização. O teor de umidade do colchão influencia diretamente nesta fase. Os autores verificaram que o tempo *plateau* aumentou de 200 para 400 segundos quando elevou-se o teor de umidade de 15% para 25%, em painéis MDP, com densidade de 760 kg.m⁻³, prensados a 180°C, pois precisam de mais energia para vaporizar a água presente. Consequentemente, quando a mesma quantidade de calor era fornecida aos colchões, o mais alto exigia um estágio de vaporização mais longo.

Taghiyari, Moradiyan e Ferazi (2013) produzindo painéis MDF com a mistura de cinco espécies típicas do Irã, 16 mm de espessura, 680 kg.m⁻³ de densidade e os pratos da prensa a temperatura de 150°C, observaram decréscimo de temperatura no miolo do painel durante o período compreendido entre o terceiro e o sétimo minuto. Esse decréscimo é justificado pela redução do teor de umidade do colchão, ou seja, a evaporação de água ocorrida nesse período reflete na diminuição do calor transferido, fazendo que com a curva de temperatura apresente declínio.

Após esse período de queda, a temperatura retomou a elevação em todos os tratamentos, dando início a quinta e última fase, que foi iniciada em 379s, 475s, 693s e 759s, respectivamente para T1, T2, T3 e T4. Nesta fase, a temperatura aumentou de forma progressiva à medida o tempo foi passando. Zombori (2001) e Bolton *et al.* (1989) atribuíram alguns fatores como responsáveis pelo resgate do aumento da temperatura, como redução do teor de umidade em praticamente todo o colchão e um gradiente de vapor na direção horizontal entre o miolo e as bordas do painel. Já Roffi *et al.* (2016) associam a pressão de vapor, visto que no final da vaporização, a pressão de vapor é reduzida rapidamente o que faz com que temperatura comece a aumentar lentamente, ocorrendo a transferência de calor nessa fase apenas por condução.

A tabela 4 apresenta as variações de temperatura por minuto, onde é possível destacar que o segundo e terceiro minuto de prensagem obtiveram as maiores variações positivas para todos os tratamentos e o quarto minuto apenas para o T4.

Tabela 4 - Variação da temperatura por minuto de prensagem

Intervalo de tempo(s)	Variação de temperatura (°C)			
	T1 _(650;15)	T2 _(650;18)	T3 _(750;15)	T4 _(750;18)
0 a 60	6,5	2,9	2,2	2,0
61 a 120	49,6	24,0	22,7	5,3
121 a 180	30,9	55,2	44,4	27,2
181 a 240	-1,7	0,4	28,7	45,6
241 a 300	-1,2	-0,9	5,1	7,8
301 a 360	-0,6	-0,6	-0,6	2,1
361 a 420	0,3	-0,4	-1,9	-0,6
421 a 480	1,4	-0,2	-2,0	-1,2
481 a 540	2,6	0,1	-1,9	-1,1
541 a 600	3,9	0,6	-1,8	-0,9
601 a 660	5,2	1,3	-1,9	-0,5
661 a 720	6,0	2,1	0,4	-0,3
721 a 780	6,2	2,9	2,6	0,0
781 a 840	6,0	3,6	3,8	0,7
841 a 900	1,7	3,8	4,2	1,5
901 a 960	-	-	0,9	2,0

Legenda: T1 (650 kg.m⁻³, 15 mm); T2 (650 kg.m⁻³, 18 mm); T3 (750 kg.m⁻³, 15 mm); T4 (750 kg.m⁻³, 18 mm).
Fonte: elaborado pelo autor (2020).

Observa-se também pela tabela 4, que há uma dificuldade em retomar o crescimento da temperatura após o período de queda, em virtude do minuto subsequente a este fato, apresentar as menores ascensões dos seus respectivos ciclos de prensagem, sendo tratamento T1(0,3°C), T2(0,1°C), T3 (0,4°C) e T4 (0°C).

Através do modelo matemático desenvolvido por Nigro e Storti (2002) que avaliou a transferência de calor e massa na prensagem a quente de painéis MDF foi possível concluir que os efeitos convectivos são responsáveis por aumentar a transferência de calor da superfície para o centro da placa, devido à evaporação água e condensação.

Kumar, Gupta e Sharma (2013) pesquisando especificamente a transferência de calor em painéis MDF, obtiveram fases mais curtas e com intervalos de ocorrência em tempos

divergentes aos verificados neste estudo. A primeira fase, caracterizada pela baixa ascensão de temperatura, ocorreu entre 0-14 segundos; a segunda fase, com a maior variação de temperatura, no período compreendido entre 15 e 70 segundos, devido a um forte gradiente de pressão de vapor. A partir de 130 s ocorreu um aumento gradual, causado pela transferência de calor por condução. Alguns fatores podem ter contribuído para tal resultado, como a espessura do painel (12 mm) e a temperatura dos pratos da prensa (180°C), sendo a primeira inferior e a segunda superior as variáveis utilizadas neste estudo.

Dai, Yu e Zhou (2005) buscando descrever um modelo teórico para prever as mudanças nos espaços vazios no interior do colchão de MDF em função do tamanho das fibras e densificação do colchão, concluíram que as variações de temperatura e pressão que ocorrem na região central do painel durante a prensagem a quente, estão associadas aos efeitos de permeabilidade, porosidade e dimensões das fibras que formam o colchão.

Lee, Kamke e Watson (2007) através de um modelo matemático do processo de consolidação de painéis OSB durante a prensagem a quente, verificaram que o modelo previa um processo mais lento no aumento da pressão durante a prensagem inicial, possivelmente porque a temperatura do colchão tem maior ascensão pela maior permeabilidade durante este estágio. À medida que a espessura da tira aumenta, a permeabilidade transversal e plana do colchão torna-se maior, em virtude do maior volume vazio entre as tiras.

Wu, Yu e Chen (2006) identificaram três estágios distintos de transferência de calor na porção central de painéis MDP, o primeiro caracterizado pelo rápido aumento de temperatura, onde os maiores valores de teor de umidade do colchão e temperatura da prensa resultaram na propagação de calor ainda mais acelerada; o segundo pela vaporização da umidade, onde maiores temperaturas e menores teores de umidade encurtaram o tempo desta fase; o terceiro pelo aumento lento de temperatura.

Em relação aos tempos ótimos de prensagem para se ter valores de propriedades físicas e mecânicas de acordo com os parâmetros estabelecidos pelas normas de qualidade, tem-se Albuquerque (2002), que trabalhando com ciclos de prensagem para painéis aglomerados (MDP), concluiu que o tempo a partir de 240 segundos foi o suficiente para a consolidação efetiva do painel. Vale ressaltar que esse tempo foi o ideal para as seguintes características e condições empregadas: 15mm de espessura, formado por partículas finas e grossas, 3% de umidade, 2% de catalisador, densidade de 0,7 g/cm³ e 8% de resina ureia formaldeído; e Calegari *et al.* (2005), que estudando o monitoramento da temperatura no interior de chapas aglomeradas com dois tipos de geometria de partícula, constatou que o tempo de 150 s foi o suficiente para atingir 100°C no miolo do painel. Os autores também puderam verificar que a

temperatura se manteve estável no primeiro minuto de prensagem, com um crescimento irrisório, resultado este, idêntico ao encontrado nesse trabalho.

3.2 Influência da densidade no tempo de prensagem

Como pode ser visto na tabela 5, a densidade exerceu efeito significativo no tempo de prensagem, exceto na primeira fase. Em todas as fases os painéis com maior densidade, tiveram períodos mais duradouros, pois a maior densidade atuou retardando a propagação de calor. Cai, Muehl e Winandy (2006) justificam que os painéis mais densos possuem menor porosidade, o que torna mais difícil a migração de vapor em direção ao núcleo, resultando em maiores tempos. A última fase foi a única que apresentou resultado oposto a este, inclusive obteve a maior diferença com 238 s, reflexo do período de ocorrência da fase anterior, onde a maior densidade durou 376 s, reduzindo conseqüentemente o período da fase subsequente.

Tabela 5 - Valores médios das fases de prensagem em função da espessura

Densidade	Tempo final de cada fase da prensagem (s)				
	1 ^a	2 ^a	3 ^a	4 ^a	5 ^a
650 kg.m ⁻³	60 ₍₆₀₎ A	163 ₍₁₀₃₎ A	195 ₍₃₂₎ A	426 ₍₂₃₁₎ A	871 ₍₄₄₅₎ A
750 kg.m ⁻³	74 ₍₇₄₎ A	260 ₍₁₈₆₎ B	349 ₍₈₉₎ B	725 ₍₃₇₆₎ B	932 ₍₂₀₇₎ B
Diferença de duração	14	83	57	145	238

Legenda: valores entre parênteses se referem ao tempo de duração de cada uma das fases de prensagem. Médias seguidas de mesma letra na coluna não diferem estatisticamente entre si pelo Teste de Scott-Knott a 5% de probabilidade de erro. Fonte: elaborado pelo autor (2020).

Quanto ao tempo de cura da resina, os painéis com 750 Kg.m⁻³ levaram em média 59 s a mais para alcançar 100°C no miolo do painel, quando comparado com os de 650 Kg.m⁻³.

Avaliando a transferência de calor no interior de painéis MDP com diferentes densidades, Rofii *et al.* (2016) perceberam que as maiores densidades (superior a 680 Kg.m⁻³) apresentaram diminuição de temperatura no final do estágio de vaporização e depois aumentaram novamente buscando atingir a temperatura dos pratos da prensa, enquanto que os painéis menos densos (540 a 610 Kg.m⁻³) não apresentam igual comportamento. Esse resultado indica que diferentes densidades refletem em diferentes tempos *plateau*. Quanto mais baixa for a densidade, menor será o estágio de vaporização.

No estudo que avaliou a influência da densidade na propagação de calor em painéis MDF, desenvolvido por Cai, Muehl e Winandy (2006) foi possível concluir que painéis com

maior densidade levaram mais tempo para aumentar a temperatura central de 40 para 100°C e alcançar a temperatura máxima.

Garcia, Avramidis e Lam (2001) através do monitoramento da transferência de calor no miolo de painéis OSB com diferentes densidades, constataram que esta exerce efeito positivo na condução de temperatura e um efeito negativo na permeabilidade lateral, transversal e convecção térmica transversal.

3.3 Influência da espessura no tempo de prensagem

A influência da espessura nas fases de prensagem apresentou menores diferenças que as encontradas na variável densidade. Além disso, é possível observar que a espessura não apresentou efeito significativo no tempo de prensagem. O comportamento foi similar, onde a maior espessura resultou em tempos mais longos em todas as fases, exceto na quinta fase, devido ao maior tempo da fase anterior. Destaque para a segunda fase com a menor diferença (doze segundos) devido ao ritmo acelerado de propagação de calor.

Tabela 6 - Valores médios das fases de prensagem em função da espessura

Espessura	Tempo final de cada fase da prensagem (s)				
	1 ^a	2 ^a	3 ^a	4 ^a	5 ^a
15 mm	60 (60) A	210 (150) A	253 (43) A	535 (282) A	883 (348) A
18 mm	74 (74) A	212 (138) A	291 (79) A	616 (325) A	920 (304) A
Diferença de duração	14	12	36	43	44

Legenda: valores entre parênteses se referem ao tempo de duração de cada uma das fases de prensagem. Médias seguidas de mesma letra na coluna não diferem estatisticamente entre si pelo Teste de Scott-Knott a 5% de probabilidade de erro. Fonte: elaborado pelo autor (2020).

Quanto ao tempo de cura da resina, os painéis com 18 mm de espessura levaram em média 39 s a mais para alcançar 100°C no miolo do painel, quando comparado com os de 15 mm.

4 CONCLUSÃO

A prensagem dos painéis MDF foram segmentadas em cinco fases, onde se destacam três principais: (1) aumento rápido da temperatura em um curto espaço de tempo; (2) fase de *plateau* com baixa redução da temperatura e; (3) retomada do aumento da temperatura.

Em cada uma das fases, os painéis com menor densidade e espessura, apresentaram os menores tempos para a finalização, exceto a última fase.

A densidade influenciou significativamente o tempo de prensagem, enquanto que o mesmo não foi observado para a variável espessura.

As maiores temperaturas registradas ao término de cada fase foram observadas nos painéis 750 kg.m^{-3} e 15 mm, com exceção da primeira e última fase, nestas, os painéis com menor densidade e menor espessura apresentaram as maiores elevações.

O tempo para o centro dos painéis atingir a temperatura mínima de cura do adesivo (100°C), foi influenciado pela densidade e espessura dos painéis.

Painéis com densidade de 650 kg.m^{-3} , atingiram a temperatura mínima de cura do adesivo com 2:18 minutos para 15 mm e 2:52 minutos para 18 mm; enquanto que os painéis com densidade de 750 kg.m^{-3} , atingiram a temperatura mínima de cura do adesivo com 3:12 minutos para 15 mm e 3:55 minutos para 18 mm.

REFERÊNCIAS

- ALBUQUERQUE, C. E. C. **Interações de variáveis no ciclo de prensagem de aglomerados**. 2002. Tese (Doutorado) – Curso de Pós-graduação em Ciências Florestais, Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2002.
- BOLTON, A.J.; HUMPHREY, P.E.; KAVVOURAS, P.K. The hot pressing of dry-formed wood-based composites. Part III. Predicted vapour pressure and temperature variation with times, compared with experimental data for laboratory boards. **Holzforshung**, v. 43, n. 4, p. 265-274, 1989.
- CAI, Z.; MUEHL, J. H.; WINANDY, J. E. Effects of panel density and mat moisture content on processing medium density fiberboard. **Forest Products Journal**, v. 56, n. 10, p. 20-25, 2006.
- CALEGARI, L.; HASELEIN, C. R.; HACK, C.; GATTO, D. A.; BARROS, M. V.; SANTINI, E. J. Monitoramento da temperatura no interior de chapas aglomeradas durante o processo de prensagem. **Ciência Florestal**, v. 15, n. 2, p. 157-166, 2005.
- CAMPOS, C. I.; LAHR, F. A. R. MDF: processo de produção, propriedades e aplicações. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA E CIÊNCIA DOS MATERIAIS, 2002, Natal. **Anais**. Natal: UFRN, 2002. p. 2054-2059.
- 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**, v. 37, p. 241-258, 2003.
- CRUZ, K. A. S.; CHEUNG, N.; GARCIA, A. Parâmetros térmicos, macroestrutura e microestrutura na solidificação direcional da liga Al-20%Sn, **Tecnologia em Metalurgia e Materiais**, v.4, n.4, p. 21-26, 2008.
- DAI, C.; YU, C.; ZHOU, X. Heat and mass transfer in wood composite panels during hot pressing. Part II. Modeling void formation and mat permeability. **Wood and Fiber Science**, v. 37, n. 2, p. 242-257, 2005.
- GARCIA, P. J.; AVRAMIDIS, S.; LAM, F. Internal temperature and pressure responses alignment during hot-pressing. **Holz als Roh und Werkstoff**, v. 59, n. 4, p. 272-275, 2001.
- GUPTA, A.; JORDAN, P.J.; PANG, S.; CHAPMAN, K. M. Modelling of hot pressing of MDF. Wood Technology Research, Departamento of chemical & Process Engineering, University of Canterbury, Christchurch, New Zealand, 2006.
- IWAKIRI, S.; TRIANOSKI, R.; ROSA, T. S.; COSTA, L.S.S. Effects of temperature and pressure time in the manufacture of particleboards. **Floresta**, v.49, n.3, p. 383-390, 2019.
- KAMKE, F.A; CASEY, L.J. Fundamentals of flakeboard manufacture: internal-mat conditions. **Forestry Products Journal**, v.38, n. 6, p. 38-44, 1988.
- KAVAZOVIC, Z.; DETEIX, J.; CLOUTIER, A.; FORTIN, A. Sensitivity study of a numerical model of heat mass transfer involved during the medium density fiberboard hot pressing process. **Wood and Fiber Science**, v. 42, n. 2, p. 130-149, 2010.

- KUMAR, A.; GUPTA, A.; SHARMA, K. V.; Use of aluminum oxide nanoparticles in wood composites to enhance the heat transfer during hot-pressing. **European Journal of Wood Products**, v. 71, p. 193-198, 2013.
- LEE, J. N.; KAMKE, F. A.; WATSON, L. T. Simulation of the Hot-pressing of a Multi-layered Wood Strand Composite. **Journal of Composite Materials**, v. 41, n. 7, p. 879-904 2007.
- LIMA, F. O.; SILVA, L. C. L.; CAMPOS, C. I.; CHRISTOFORO, A. L.; LAHR, A. R. Influência do tempo de prensagem em propriedades físicas e mecânicas de painéis MDP. **Scientia Forestalis**. v. 46, n. 119, p. 387-393, 2018.
- MALONEY, T. M. **Modern particleboard and dry-process fiberboard manufacturing**. 2.ed. São Francisco: Miller Freeman, 1993. 689 p.
- NIGRO, N.; STORTI, M. Hot-pressing process modeling for medium density fiberboard (MDF). Centro Internacional de Metodos Computacionales en Ingenieria.2002.
- PICHELIN, F.; PIZZI, A.; FRUHWALD, A.; TRIBOULOT, P. Exterior OSB preparations technology at high moisture content, Part 1. Transfer mechanisms and pressing parameters. **Holz Roh Werks**, v. 59, p. 256-265, 2001.
- ROFII, M. N.; KUBOTA, S.; KOBORI, H.; KOJIMA, Y. Furnish type and density effects on temperature and vapor pressure of wood-based panels during hot pressing. **Journal of Wood Science**, v. 62, p. 168-173, 2016.
- ROFII, M. N.; YAMAMOTO, N.; UEDA, S.; KOJIMA, Y.; SUZUKI, S. The temperature behaviour inside the mat of wood-based panel during hot pressing under various manufacturing conditions. **Journal of Wood Science**, v. 60, p. 414-420, 2014.
- SILVA, A. P. S. **Análise da influência da adição de nanopartículas de ZnO nas propriedades físico-mecânicas e de transferência de calor em painéis de fibra de madeira**. 2018. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica na área de materiais) – Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2018.
- STEFFEN, A.; VONHAAS, G.; RAPP, A.; HUMPHREY, P.E.; THOEMEN, H. Temperature and gas pressure in MDF-mats during industrial continuous hot pressing. **Holz Roh Werks**, v. 57, p. 154-155, 1999.
- TAGHIYARI, H. R.; MORADIYAN, A.; FERAZI, A. Effect of Nanosilver on the rate of heat transfer to the core of the medium density fiberboard Mat. **International Journal of Bio-inorganic Hybrid Nanomaterials**, v. 2, n. 1, p. 303-308, 2013.
- WU, J.; YU, Z.; CHEN, T. Heat-transfer process during hot-pressing of flakeboard. **Frontiers of Forestry China**, 1, p. 343–347, 2006.
- ZOMBORI, B. G. **Modeling the transient effects during the hot-pressing of wood-based composites**. 2001. Tese (Ph.D.) - Faculty of the Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, Virginia, 2001.

CAPÍTULO III - INFLUÊNCIA DO TEMPO DE Prensagem NAS PROPRIEDADES TECNOLÓGICAS DOS PAINÉIS DE FIBRAS DE MÉDIA DENSIDADE

1 INTRODUÇÃO

Os painéis de fibras de média densidade, denominados de MDF, são constituídos pelo entrelaçamento de fibras de espécies florestais de baixa densidade como as do gênero *Pinus* e adesivo termoendurecedor, o qual é consolidado pela ação de pressão e calor. Entre suas principais características destacam-se a estabilidade dimensional, homogeneidade, superfície plana e lisa, alta usinabilidade, menor consumo de tintas e vernizes, e ótima aceitação de revestimentos. Desta forma, são painéis muito utilizados na indústria moveleira mundial, bem como na construção civil e em vários outros setores industriais (CAMPOS; LAHR, 2002).

O desfibramento dos cavacos, a secagem das fibras e a prensagem a quente são as etapas mais importantes do processo, e que também consomem grande quantidade de energia para a fabricação dos painéis. Muitos parâmetros afetam o tempo de prensagem a quente, como a densidade da matéria-prima, as características da resina, o teor de umidade das fibras no colchão, a velocidade de fechamento dos pratos da prensa, as demais variáveis do ciclo de prensagem como temperatura e pressão, a densidade e espessura do painel, entre outros.

Cai, Muehl e Winandy (2006) citam que durante a prensagem a quente, o calor inicialmente é transferido dos pratos quentes para as camadas externas do painel por condução e, em seguida, continua a migrar em direção a camada central. A velocidade de penetração do calor no colchão determina o tempo de prensagem, que é crítico para a produtividade e o estabelecimento das propriedades do painel, como módulo de elasticidade, módulo de ruptura, ligação interna e absorção de água. Tempos de prensagem muito curtos podem resultar em painéis não consolidados e muito longos podem elevar o custo de produção que não é desejado pelas indústrias. Sendo assim, não se tem um intervalo de tempo fixo para que essa etapa seja concluída com êxito, visto o grande número de variáveis que interferem no processo.

Muitos estudos individuais foram conduzidos para investigar o efeito das variáveis do processo na prensagem a quente, e alguns modelos teóricos foram desenvolvidos para simular o processo de prensagem a quente como Humphrey (1982) que desenvolveu o primeiro modelo de transferência de calor e massa para painéis particulados, o qual foi baseado nos princípios físicos fundamentais, que incluem a convecção de vapor e condução de calor; Carvalho e Costa (1998) que através de um modelo tridimensional buscaram descrever de que forma acontecia o fluxo de calor durante a prensagem a quente em painéis MDF, onde o modelo previa a evolução

espacial e temporal de temperatura, teor de umidade, vapor, pressão e umidade relativa; Carvalho, Costa e Costa (2003) que estudaram a evolução das variáveis relativa à transferência de calor e massa (temperatura, teor de umidade, pressão e umidade relativa), bem como as variáveis relacionadas ao comportamento mecânico (pressão, tensão, módulo de elasticidade e densidade); e Gupta *et al.* (2006) que criaram um modelo mais abrangente que considerava além da transferência de calor e massa, a cinética de polimerização da resina em painéis MDF e obtiveram como conclusão que a densidade de pico prevista e a temperatura central do painel no modelo eram maiores que a experimental. Todos estes estudos demonstraram que, as características do colchão como densidade e espessura, são as principais variáveis que afetam a transferência de calor, e por consequência o tempo de prensagem.

Estudos que avaliam as propriedades tecnológicas em função de diferentes tempos de prensagem já vem sendo desenvolvidos a um bom tempo, a exemplo de Nemli (2002), que objetivando avaliar a influência de dois tempos de prensagem (135 e 150 segundos) na qualidade de painéis aglomerados produzidos com partículas de faia, pinho e choupo percebeu que o maior tempo de prensagem conferiu aos painéis melhores propriedades físicas e mecânicas; Salari *et al.* (2013) que, trabalhando com painéis particulados de *Paulownia fortunei*, espécie típica do Irã, percebeu que o aumento do tempo de prensagem de sete para dez minutos desfavoreceu todas as propriedades dos painéis analisadas, reduzindo a estabilidade dimensional, resistência e rigidez; Lima *et al.* (2018), que estudando a influência do tempo de prensagem nas propriedades de painéis particulados de *Eucalyptus ssp*, observaram que a utilização de baixos tempos como 3 minutos foi insatisfatória e entre 5 e 10 minutos, não apresentaram diferenças significativas nas propriedades avaliadas; Iwakiri *et al.* (2019) que verificaram que o aumento do tempo de prensagem interferiu significativamente na redução da absorção de água, no aumento da resistência à flexão estática e tração perpendicular.

Mesmo com diversos estudos abordando o tempo de prensagem de painéis particulados e fibrosos, faz-se necessário o desenvolvimento de pesquisas com adesivos mais modernos que reduzam a razão molar para atender aos limites de emissão de formaldeído e com a utilização das variáveis de processo que são utilizadas nas indústrias. Desta forma, o objetivo deste capítulo foi avaliar a influência do tempo de prensagem nas propriedades tecnológicas de painéis MDF com diferentes espessuras, de modo a se obter o tempo mínimo para garantir uma produção satisfatória com propriedades físicas e mecânicas equivalentes ao estabelecido pela norma de referência.

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Matéria-prima

Na produção dos painéis, foram utilizadas fibras de *Pinus taeda* L. com densidade de 399 kg.m^{-3} , provenientes do processo produtivo de painéis MDF da Empresa Sudati – Unidade de Otacílio Costa, as quais foram retiradas após o processo de desfibramento termomecânico; resina uréia-formaldeído e emulsão de parafina, fornecidas pela mesma empresa. A resina apresentava, conforme boletim técnico da empresa, 1,08 de razão molar, 220 cP de viscosidade, 60% de teor de sólidos, 75-80 segundos de gel time e 7,6 de ph; e a emulsão de parafina 58,3 % de teor de sólidos, 20- 25 segundos de gel time e ph igual a 8,9.

2.2 Plano experimental

A partir do estudo preliminar desenvolvido no capítulo II com painéis de densidade 650 kg.m^{-3} e espessuras de 15 mm e 18 mm, por meio da utilização de termopares para avaliar a transferência de calor ao longo da espessura do painel, delineou-se os tratamentos apresentados na tabela 7.

Tabela 7 - Plano experimental.

Tratamento	Espessura (mm)	Tempo de prensagem (min)	Tratamento	Espessura (mm)	Tempo de prensagem (min)
T1 _(100°C)	15	02:18	T8 _(100°C)	18	02:52
T2 _(100°C+1)		03:18	T9 _(100°C+1)		03:52
T3 _(100°C+2)		04:18	T10 _(100°C+2)		04:52
T4 _(100°C+3)		05:18	T11 _(100°C+3)		05:52
T5 _(100°C+4)		06:18	T12 _(100°C+4)		06:52
T6 _(100°C+5)		07:18	T13 _(100°C+5)		07:52
T7 _(100°C+6)		08:18	T14 _(100°C+6)		08:52

Legenda: T: tratamento; valores subscritos e entre parênteses se referem ao tempo até a camada central do painel atingir 100°C mais 1, 2, 3, 4, 5 e 6 minutos. Fonte: elaborado pelo autor (2020).

Foram produzidos três painéis por tratamento com dimensões de 40 x 40 cm, espessura de 15 mm e 18 mm, 12% de resina ureia formaldeído, 1% de emulsão de parafina com base no

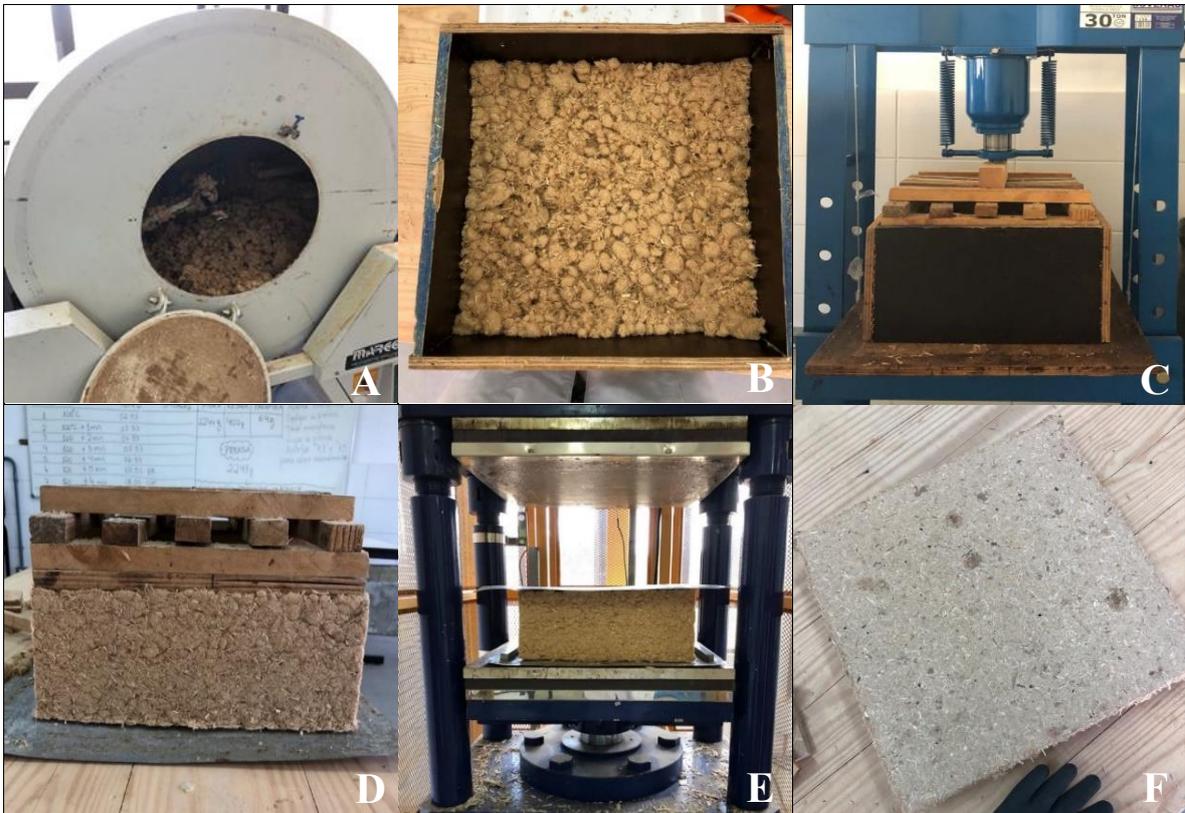
peso seco das fibras, pré-prensagem a frio com pressão de 5 kgf.cm^{-2} por um tempo de 10 minutos, e ciclo de prensagem quente com 35 kgf.cm^{-2} de pressão e $170 \text{ }^\circ\text{C}$ de temperatura dos pratos da prensa.

2.3 Produção dos painéis

O único tratamento aplicado as fibras antes da produção dos painéis foi a secagem, que foi realizada em uma estufa com circulação forçada de ar a temperatura de 80°C , até $4\pm 1\%$ de umidade. O controle do teor de umidade foi realizado diariamente por meio de uma balança com medidor infravermelho.

A produção dos painéis (figura 6) envolveu a aplicação da resina e da parafina de forma independente sobre as fibras em um tambor rotativo, dotado de uma pistola pulverizadora localizada no centro do tambor, a qual era acionada por um compressor de ar. Formada a massa de fibras, resina e parafina, em quantidade pré-calculada, foi colocada em uma caixa formadora com dimensões internas de $40 \times 40 \text{ cm}$ para a formação do colchão, na qual foi posteriormente aplicada a pré-prensagem com intuito de desenvolver as primeiras etapas da adesão (fluidez, transferência e penetração parcial) e reduzir a espessura do colchão. A prensagem a quente foi realizada em uma prensa hidráulica Marconi MA 098, na qual foi aplicado o ciclo de prensagem apresentado no plano experimental. Após a prensagem, os painéis foram armazenados em uma sala climatizada, com temperatura de 20°C e 65% de umidade relativa do ar até obter a massa constante.

Figura 6 - Produção dos painéis 40x40 cm. (A) encoladeira com a massa de fibras; (B) caixa formadora com a massa de fibras; (C) prensagem à frio; (D) colchão após a prensagem à frio; (E) prensagem à quente; (F) painel formado.



Fonte: elaborado pelo autor (2020).

2.4 Caracterização tecnológica dos painéis

Após a climatização, os painéis foram esquadrejados para as dimensões de 38 x 38 cm com o intuito de reduzir os efeitos de borda. O dimensionamento dos corpos-de-prova, bem como os procedimentos para a realização dos ensaios físicos e mecânicos foram baseados na NBR 15316 (ABNT, 2019). Também foram determinados a razão de compactação, a taxa de não retorno em espessura e o perfil vertical de densidade por meio do densitômetro de raios-X IMAL, modelo DPX300.

A razão de compactação foi determinada pela relação entre a densidade de cada corpo de prova e a densidade da matéria-prima (399 kg.m^{-3}). Para taxa de não retorno em espessura, foram utilizados os corpos de prova do ensaio de inchamento em espessura. O cálculo foi realizado com as espessuras dos corpos de prova após a imersão em água durante 24 horas e após a climatização em temperatura (20°C) e umidade relativa (65%) controladas até massa constante.

2.5 Análise dos dados

O experimento foi realizado em delineamento inteiramente casualizado com arranjo fatorial, com dois fatores (espessura 15 e 18 mm) e sete níveis (prensagem: tempo até o centro do painel atingir 100°C; 100°C+1 minuto; 100°C+2; 100°C+3, 100°C+4; 100°C+5; e 100°C+6).

Os valores encontrados em cada uma das propriedades avaliadas foram submetidos a verificação da normalidade da distribuição dos dados pelo teste de Shapiro-Wilk (dados < 30) e Kolmogorov-Smirnov (dados > 30) e homogeneidade das variâncias pelo teste de Bartlett. Com os pressupostos atendidos, foi realizada a análise de variância e, quando necessário, o teste de Scott-Knott para comparação das médias, com 5% de probabilidade de erro. Para verificar a correlação existente entre as propriedades analisadas utilizou-se a correlação de Pearson, com 5% de probabilidade de erro. Todas as análises foram realizadas no *software* R.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Propriedades físicas dos painéis

3.1.1 Densidade e razão de compactação

A tabela 8 apresenta os valores médios de densidade e razão de compactação. Para ambas as propriedades não foi verificada diferença significativa para espessura nos diferentes tempos de prensagem. Como a densidade apresentou variação de 651 a 669 kg.m⁻³, os painéis de todos os tratamentos podem ser classificados como de média densidade para condições secas, segundo a NBR 15316 (ABNT, 2019), que estabelece intervalo entre 651 kg.m⁻³ e 800 kg.m⁻³ para tal classificação.

Tabela 8 - Valores médios de densidade e razão de compactação

Tempo de prensagem	Densidade [Kg.m ⁻³]		Razão de Compactação	
	15 mm	18 mm	15 mm	18 mm
Até atingir 100 °C	T1 653 _(2,66) Aa	T8 651 _(6,13) Aa	T1 1,64 _(2,66) Aa	T8 1,63 _(6,13) Aa
100 °C + 1 min	T2 654 _(7,31) Aa	T9 652 _(7,43) Aa	T2 1,64 _(7,31) Aa	T9 1,63 _(7,43) Aa
100 °C + 2 min	T3 658 _(3,52) Aa	T10 655 _(5,60) Aa	T3 1,65 _(3,52) Aa	T10 1,64 _(5,60) Aa
100 °C + 3 min	T4 664 _(6,31) Aa	T11 658 _(7,43) Aa	T4 1,66 _(6,31) Aa	T11 1,65 _(7,43) Aa
100 °C + 4 min	T5 658 _(3,92) Aa	T12 669 _(4,70) Aa	T5 1,65 _(3,92) Aa	T12 1,68 _(4,70) Aa
100 °C + 5 min	T6 656 _(8,43) Aa	T13 663 _(6,98) Aa	T6 1,64 _(8,43) Aa	T13 1,66 _(6,98) Aa
100 °C + 6 min	T7 653 _(7,58) Aa	T14 657 _(5,28) Aa	T7 1,64 _(7,58) Aa	T14 1,65 _(5,28) Aa
Média	657	658	1,65	1,65
Densidade nominal	650 Kg.m ⁻³			
Razão de compactação (Moslemi, 1974; Maloney, 1993)	acima de 1,3			

Legenda: Sobrescrito: tratamento. Subscrito: coeficiente de variação (%). Médias seguidas de mesma letra maiúscula na coluna não diferem estatisticamente entre si para tempo de prensagem dentro de uma mesma espessura; médias seguidas de mesma letra minúscula na mesma linha não diferem estatisticamente entre si para espessura dentro do mesmo tempo de prensagem, ambos pelo Teste de Scott-Knott a 5% de probabilidade de erro. Fonte: elaborado pelo autor (2020).

A ausência de diferença estatística entre os tratamentos nas duas propriedades indica homogeneidade na deposição de fibras e aditivos (resina + emulsão de parafina) durante a

produção dos painéis. Este resultado é satisfatório, uma vez que, tende a não interferir nos resultados das demais propriedades físicas e mecânicas.

Mesmo não havendo diferença estatística, foi verificado que o aumento do tempo de prensagem resultou na ascensão da densidade até 100°C+3 min para os painéis com 15 mm e até 100°C +4 min para 18 mm. Essa elevação pode ser explicada pela consolidação mais efetiva dos painéis quando submetidos a maiores tempos de prensagem.

Albuquerque e Iwakiri (2005) explicam que os menores tempos de prensagem proporcionam um maior retorno em espessura após o término da prensagem, em decorrência da liberação das tensões de compressão, tendo como consequência painéis menos densos. Os autores perceberam em painéis aglomerados de *Pinus* sp. o mesmo aumento progressivo da densidade quando aumentou-se o tempo. No entanto, os tempos utilizados foram inferiores aos deste trabalho, com acréscimo de no máximo 2 minutos após o alcance da temperatura de cura da resina no centro do painel.

Vale destacar que, a partir de determinados tempos (100°C+3 min para 15mm e 100 °C+4 min para 18mm), as densidades apresentaram decréscimos em seus valores médios, mesmo com tempos maiores, o que possivelmente pode ter sido ocasionado, pelo menor peso destes tratamentos, com redução mais acentuada do teor de umidade (tabela 11).

Moslemi (1974) e Maloney (1993) indicam que valores de razão de compactação superiores a 1,3, como os encontrados no presente estudo, resultam em painéis mais densificados, o que reflete diretamente em maiores propriedades de resistência e rigidez, e menor estabilidade dimensional.

Silva *et al.* (2015) estudando diferentes razões de compactação identificaram que o aumento desta propriedade prejudicou consideravelmente a absorção de água e o inchamento em espessura de painéis particulados, principalmente os tratamentos com valores superiores a 1,6. Bufalino *et al.* (2012) observaram melhora nas propriedades físicas e mecânicas, exceto na ligação interna, quando aumentada a razão de compactação de painéis aglomerados produzidos com partículas de *Toona ciliata*, *Pinus* sp. e *Eucalyptus* sp. Vital *et al.* (1974) e Kelly (1977) atribuem o aumento nas propriedades mecânicas ao maior volume de partículas compactadas e também a maior área de contato entre as partículas em painéis de maior razão de compactação, o que resulta em melhor desempenho mecânico.

3.1.2 Perfil de densidade

Os valores de densidade média, máxima superior, central e máxima inferior, obtidos por meio do perfil de densidade são apresentados nas tabelas 9 e 10, enquanto que os gráficos representativos da densidade ao longo da espessura estão apresentados nos apêndices A e B.

Tabela 9 - Perfil de densidade dos painéis com 15 mm de espessura.

Tempo de prensagem	Perfil de densidade [Kg.m ⁻³]			
	Média	Máxima superior	Centro	Máxima inferior
Até atingir 100 °C	630,2	(+37%) 863,5 _(+56%)	(-12%) 551,8	(+33%) 836,8 _(+52%)
100 °C + 1 min	665,8	(+32%) 881,3 _(+51%)	(-12%) 582,9	(+31%) 869,3 _(+49%)
100 °C + 2 min	688,4	(+33%) 915,1 _(+58%)	(-16%) 578,4	(+29%) 889,2 _(+54%)
100 °C + 3 min	679,1	(+31%) 887,8 _(+48%)	(-12%) 599,2	(+26%) 854,5 _(+43%)
100 °C + 4 min	696,1	(+32%) 919,7 _(+53%)	(-13%) 602,4	(+32%) 918,4 _(+52%)
100 °C + 5 min	695,4	(+33%) 922,2 _(+51%)	(-12%) 611,5	(+21%) 842,4 _(+38%)
100 °C + 6 min	718,7	(+32%) 951,6 _(+53%)	(-14%) 620,4	(+28%) 919,4 _(+48%)
Média	682,0	(+33%) 905,9_(+53%)	(-13%) 592,4	(+28%) 875,7_(+48%)

Legenda: Sobrescrito: diferença percentual das densidades das camadas superior, central e inferior em relação a densidade média. Subscrito: diferença percentual das densidades das camadas superior e inferior em relação a densidade da camada central. Fonte: elaborado pelo autor (2020).

Tabela 10 - Perfil de densidade dos painéis com 18 mm de espessura.

Tempo de prensagem	Perfil de densidade [Kg.m ⁻³]			
	Média	Máxima superior	Centro	Máxima inferior
Até atingir 100 °C	612,6	(+35%) 824,1 _(+55%)	(-13%) 532,8	(+34%) 822,3 _(+54%)
100 °C + 1 min	632,1	(+36%) 859,9 _(+58%)	(-14%) 545,5	(+26%) 795,7 _(+46%)
100 °C + 2 min	601,8	(+30%) 784,3 _(+42%)	(-8%) 552,4	(+29%) 774,1 _(+40%)
100 °C + 3 min	646,2	(+30%) 841,9 _(+48%)	(-12%) 567,8	(+29%) 830,4 _(+46%)
100 °C + 4 min	671,5	(+35%) 908,4 _(+55%)	(-13%) 586,1	(+34%) 900,6 _(+54%)
100 °C + 5 min	657,2	(+32%) 865,9 _(+45%)	(-9%) 598,3	(+31%) 861,2 _(+44%)
100 °C + 6 min	679,7	(+33%) 905,0 _(+53%)	(-13%) 591,4	(+30%) 883,0 _(+49%)
Média	643,0	(+33%) 855,6_(+51%)	(-12%) 567,8	(+30%) 838,2_(+48%)

Legenda: Sobrescrito: diferença percentual das densidades das camadas superior, central e inferior em relação a densidade média. Subscrito: diferença percentual das densidades das camadas superior e inferior em relação a densidade da camada central. Fonte: elaborado pelo autor (2020).

A maior densificação das camadas externas, independente da espessura e do tempo de prensagem, observada no presente trabalho, está de acordo com todos os estudos realizados com painéis reconstituídos de madeira, conforme relata Jin *et al.* (2009), uma vez que o aquecimento inicial promove plasticização das partículas / fibras e, conseqüentemente, maior resistência a compressão (MATOS, 1988). De acordo com Li (2013), a maior compressão exercida nas superfícies se propaga em direção a porção central do painel, devido ao efeito de mola do colchão de fibras, que aumenta a densidade do centro. Como a compressão na superfície é mais forte que no centro, a sua densidade é mais alta, e por conseqüência, segundo Kollmann *et al.* (1975), favorece a estabilidade dimensional e a resistência à flexão estática. Por outro lado, painéis com densidades de pico menores na superfície indica segundo Belini, Tomazello Filho e Chagas (2009) menor consolidação do painel e superfícies com maior porosidade. Além disso Maloney (1989) complementa que baixos valores de densidade na porção central do painel, compromete as propriedades de resistência ao arrancamento de parafuso de topo e a tração perpendicular.

Ayrlmis (2007) explica que a densidade de pico não se localiza exatamente na superfície do painel, ocorrendo em uma camada de superfície interna que encontra-se próxima aos limites externos. Isso ocorre porque o efeito de amolecimento térmico na camada superficial pode ser parcialmente compensado pelo efeito de endurecimento pela perda de umidade, o que leva a uma densidade ligeiramente inferior a densidade de pico, o que faz com que o gráfico tenha formato de letra “M”.

De modo geral, para os painéis de 15 mm, houve uma tendência de aumento da densidade com o aumento do tempo de prensagem até 100°C+2 min nas três camadas analisadas ao longo da espessura, enquanto que no tempo 100°C+3 min a densidade reduziu e a partir de 100°C+4 min aumentou novamente. Para os painéis de 18 mm, a densidade de centro apresentou uma tendência linear positiva conforme o tempo de prensagem foi se prolongando. De modo geral, a densidade média, máxima superior e máxima inferior apresentaram comportamento similar.

Para o mesmo tempo de prensagem, foi verificado que a espessura de 15 mm obteve maior densificação em todas as camadas ao longo do perfil. Este resultado pode ser atribuído a menor densidade do colchão (menor altura) que terá interferência direta na zona morta (distância entre a superfície e a densidade de pico) que resulta em maior densidade.

O tempo de prensagem não mostrou interferência direta na diferença de densidade entre as superfícies e o centro, bem como entre as três camadas e a densidade média. Os painéis de 18 mm tiveram maior variação média (+53%) entre a densidade máxima superior e o centro,

quando comparados aos painéis de 15 mm (51%). Alguns trabalhos encontraram variações superiores a dessa pesquisa, como Torquato *et al.* (2010) averiguando a qualidade de painéis MDF comerciais de *Pinus* com 15 mm de espessura, o valor médio de diferença encontrado pelos autores foi 57%; Belini, Tomazello Filho e Chagas (2009) produzindo painéis MDF de *Eucalyptus grandis*, com densidade nominal de 700 Kg.m⁻³ e 18,9 mm de espessura, obtiveram 66% e 65% de diferença entre a densidade máxima superior e máxima inferior, respectivamente, em relação ao centro. O último trabalho utilizou 175 segundos de tempo de prensagem, o que possivelmente pode ter interferido na propagação da força de compressão, conferindo aos painéis uma compressão bem inferior na camada central, devido ao curto tempo utilizado, o que refletiu nessa diferença elevada.

Tomazello Filho *et al.* (2010) citam alguns fatores como os responsáveis pela depressão do perfil de densidade formado pelo valor mínimo de densidade, como a velocidade de prensagem acima do ideal, falta de massa de fibras no interior dos painéis, tempo de prensagem insuficiente e pressão abaixo da necessária.

Segundo Trianoski (2010), a diferença entre a densidade máxima e mínima em painéis de madeira reconstituída para condições industriais devem estar entre 20 e 35 %. Nenhum dos tratamentos atendeu, tendo em vista que os mesmos obtiveram valores superiores ao recomendado. O tratamento que mais se aproximou de tal recomendação foi o T4 com uma diferença de 48% para 15 mm e o T3 para 18 mm 42% de diferença. Grubert (2016) trabalhando com painéis MDP de *Pinus* spp, *Phyllostachys edulis* e *Phyllostachys bambusoides* em diferentes composições, também verificou para alguns tratamentos valores que não atendem a condição de 20-35%. Assim como Trianoski (2010) produzindo painéis com diferentes proporções de partículas de seis espécies distintas.

3.1.3 Espessura e teor de umidade

Na tabela 11, estão apresentados os valores médios de espessura e teor de umidade dos painéis, onde pode ser verificado que para a primeira variável, houve diferença estatística significativa entre os tratamentos, tanto ao longo dos diferentes tempos de prensagem, quanto para as duas espessuras. Observa-se que à medida que o tempo de prensagem foi se estendendo, a espessura dos painéis foi sendo reduzida, chegando a obter espessura inferior à dos separadores após a obtenção de 100°C de temperatura mais 4 minutos para a espessura de 15 mm. Quanto a segunda variável abordada na tabela 10, teor de umidade, observa-se a mesma tendência ao longo do tempo de prensagem, mas com uniformidade de valores médios da

porção central até 100°C+4 min e com diferença significativa a partir deste ponto; já para teor de umidade entre as espessuras, 15 e 18 mm, os valores demonstraram-se estatisticamente iguais.

Tabela 11 - Valores médios de espessura e teor de umidade.

Tempo de prensagem	Espessura [mm]		Teor de Umidade [%]	
	15 mm	18 mm	15 mm	18 mm
Até atingir 100 °C	T ¹ 15,35 _(2,04) Aa	T ⁸ 18,44 _(3,96) Ab	T ¹ 8,1 _(3,04) Aa	T ⁸ 8,3 _(6,49) Aa
100 °C + 1 min	T ² 15,20 _(1,79) Ba	T ⁹ 18,39 _(2,31) Ab	T ² 8,0 _(6,04) Aa	T ⁹ 8,3 _(2,74) Aa
100 °C + 2 min	T ³ 15,14 _(2,55) Ba	T ¹⁰ 18,30 _(2,04) Ab	T ³ 7,8 _(8,45) Aa	T ¹⁰ 7,9 _(4,34) Aa
100 °C + 3 min	T ⁴ 15,01 _(2,59) Ca	T ¹¹ 18,26 _(2,23) Ab	T ⁴ 7,8 _(6,44) Aa	T ¹¹ 7,8 _(6,64) Aa
100 °C + 4 min	T ⁵ 14,84 _(2,10) Ca	T ¹² 18,20 _(2,62) Ab	T ⁵ 7,7 _(3,32) Aa	T ¹² 7,6 _(5,56) Aa
100 °C + 5 min	T ⁶ 14,71 _(2,09) Da	T ¹³ 18,14 _(1,77) Ab	T ⁶ 7,4 _(2,55) Ba	T ¹³ 7,2 _(4,09) Ba
100 °C + 6 min	T ⁷ 14,64 _(2,28) Da	T ¹⁴ 18,11 _(2,44) Ab	T ⁷ 7,0 _(2,84) Ca	T ¹⁴ 6,0 _(5,32) Ca
Média	14,98	18,26	7,7	7,6
Espessura nominal	15 mm	18 mm		
Teor de umidade	NBR 15316 (2019)		4 a 11%	

Legenda: Sobrescrito: tratamento. Subscrito: coeficiente de variação (%). Médias seguidas de mesma letra maiúscula na coluna não diferem estatisticamente entre si para tempo de prensagem dentro de uma mesma espessura; médias seguidas de mesma letra minúscula na mesma linha não diferem estatisticamente entre si para espessura dentro do mesmo tempo de prensagem, ambos pelo Teste de Scott-Knott a 5% de probabilidade de erro. Fonte: elaborado pelo autor (2020).

Albuquerque e Iwakiri (2005) verificaram esse mesmo comportamento decrescente da espessura em painéis particulados de *Pinus* sp., encontrando 17,1 mm, 16,3 mm e 14,4 mm, para tempos até atingir 95°C, 95°C+1 min e 95°C+2 min, respectivamente, quando a meta era 15 mm. França (2015) utilizando oito minutos de prensagem na produção de painéis aglomerados de fibras *oversize* com diferentes composições de fibras e partículas, obteve espessuras próximas a determinada pelos espaçadores. Silva, Filho e Cruz (2018) produzindo painéis MDF de *Eucalyptus grandis*, com separadores de 15 mm e dez minutos de prensagem obteve valor médio de 15,03 mm, valor extremamente próximo ao desejado, devido a sua consolidação eficiente.

Levando em consideração o fator espessura, os painéis com 15 mm apresentaram maior variação (0,71 mm) que os painéis com 18 mm (0,33 mm).

Para teor de umidade, observa-se que os painéis de todos os tratamentos, mesmo após massa constante em ambiente controlado (20°C de temperatura e 65% de umidade relativa), não atingiram 12% de umidade de equilíbrio. Este fato, segundo Weber (2011), é devido as altas temperaturas dos processos de secagem das fibras, prensagem do colchão, incorporação de resina e emulsão de parafina, além da utilização de altas temperaturas e pressão na consolidação final do painel.

A partir de 100°C+4 min, para ambas as espessuras, o tempo de prensagem interferiu significativamente no teor de umidade, apresentando os menores valores médios. Maiores tempos associados a altas temperaturas de prensagem desestruturaram os componentes anatômicos e levam a uma perda da água de constituição, reduzindo, conseqüentemente o teor de umidade (WEBER, 2011). Entretanto, todos os tratamentos se enquadraram no intervalo aceitável recomendado pela NBR 15316 (ABNT, 2019).

No trabalho de Lima *et al.* (2018) que avaliou a influência do tempo de prensagem nas propriedades de painéis MDP, os resultados foram semelhantes aos verificados neste trabalho, onde o aumento do tempo de prensagem refletiu na redução do teor de umidade dos painéis. Os autores justificam esse resultado a menor eliminação de água nos menores tempos. Sanches *et al.* (2016) encontraram valores próximos a este estudo (6,23% a 9,68%) com tempo de prensagem de oito minutos para painéis aglomerados produzidos com mistura de diferentes espécies florestais. Já Mendes *et al.* (2006) avaliando a influência das variáveis de processo no teor da umidade de equilíbrio de painéis aglomerados constatou o contrário, onde o aumento do tempo de prensagem de seis para dez minutos a 160°C culminou em painéis com maior teor de umidade, os autores reiteram que esperava-se o inverso pela perda de grupos (OH), não sendo mencionada uma justificativa para este resultado.

3.1.4 Estabilidade dimensional

Na estabilidade dimensional dos painéis, que é representada pela absorção de água e inchamento em espessura (tabela 12), e taxa de não retorno em espessura - TNRE (tabela 13), observa-se redução dos valores médios com o aumento do tempo de prensagem, no entanto, para absorção e inchamento a redução segue até 100°C + 4 min, onde vem a aumentar; já para a TNRE, o ponto máximo de redução varia conforme a espessura, sendo 100 °C+3 min para a espessura de 15 mm, e 100°C+4 min para a espessura de 18 mm, após estes dois pontos, a tendência é a mesma da absorção e inchamento.

Tabela 12 - Valores médios de absorção de água e inchamento em espessura.

Tempo de prensagem	Absorção após 24h [%]		IE após 24h [%]	
	15 mm	18 mm	15 mm	18 mm
Até atingir 100 °C	T ¹ 78,28 _(2,06) Aa	T ⁸ 71,58 _(3,19) Aa	T ¹ 21,17 _(7,53) Aa	T ⁸ 16,16 _(10,59) Ab
100 °C + 1 min	T ² 67,42 _(8,33) Ba	T ⁹ 63,16 _(4,62) Ba	T ² 18,43 _(9,37) Ba	T ⁹ 13,97 _(06,85) Bb
100 °C + 2 min	T ³ 57,67 _(5,77) Ca	T ¹⁰ 57,13 _(9,60) Ca	T ³ 14,15 _(4,58) Ca	T ¹⁰ 13,40 _(09,19) Ba
100 °C + 3 min	T ⁴ 47,43 _(3,15) Fa	T ¹¹ 45,35 _(9,58) Fa	T ⁴ 11,85 _(5,30) Ca	T ¹¹ 11,00 _(10,44) Ca
100 °C + 4 min	T ⁵ 45,36 _(3,19) Fa	T ¹² 44,52 _(3,05) Fa	T ⁵ 11,17 _(5,55) Ca	T ¹² 10,61 _(11,63) Ca
100 °C + 5 min	T ⁶ 49,96 _(4,56) Ea	T ¹³ 50,35 _(6,41) Ea	T ⁶ 12,27 _(3,51) Ca	T ¹³ 12,00 _(11,67) Ca
100 °C + 6 min	T ⁷ 53,36 _(6,56) Da	T ¹⁴ 52,88 _(3,75) Da	T ⁷ 13,28 _(4,52) Ca	T ¹⁴ 12,79 _(06,27) Ca
Média	57,07	55,00	14,62	12,85
NBR 15316 (2019)			Máximo 12%	

Legenda: Sobrescrito: tratamento. Subscrito: coeficiente de variação (%). Médias seguidas de mesma letra maiúscula na coluna não diferem estatisticamente entre si para tempo de prensagem dentro de uma mesma espessura; médias seguidas de mesma letra minúscula na mesma linha não diferem estatisticamente entre si para espessura dentro do mesmo tempo de prensagem, ambos pelo Teste de Scott-Knott a 5% de probabilidade de erro. Fonte: elaborado pelo autor (2020).

Na tabela 12, observa-se que o tempo de prensagem influenciou de forma significativa nas duas propriedades avaliadas, absorção e inchamento. No entanto, para as diferentes espessuras (15 e 18 mm) em um mesmo tempo de prensagem, constatou-se diferença significativa somente para inchamento em espessura nos tempos iniciais (até atingir 100°C e 100°C+1 min), a partir destes, os demais foram equivalentes.

Os altos valores de absorção de água e inchamento em espessura nas fases iniciais da prensagem podem ser decorrentes da falta de consolidação do colchão, o que refletiu em painéis de baixa densidade (tabela 8) e com uma quantidade maior de espaços vazios, tornando-os mais higroscópicos. À medida que o processo de cura da resina foi sendo finalizado e o painel foi se consolidando, a quantidade de espaços vazios foi sendo reduzida, o que proporcionou valores mais próximos ao definido pela norma de referência, que é de 12% para inchamento em espessura após 24 horas de imersão em água. Mendes *et al.* (2002) complementam que painéis mais densos possuem um maior peso lenhoso compactado para uma mesma espessura, o que resulta numa barreira física que dificulta absorção capilar de água. A degradação da hemicelulose também poder ter contribuído para tal resultado; embora esse polímero tenha característica hidrofílica, quando exposto a maior temperatura e tempo, sua estrutura sofre alteração, reduzindo dessa forma, sua higroscopicidade (WINANDY; KRZYSIK, 2007).

A partir do ponto de obtenção de 100°C+4 min para ambas as variáveis, os valores médios voltaram a subir. Lima *et al.* (2018) estudando a influência do tempo de prensagem nas propriedades tecnológicas de painéis particulados, observaram que o aumento do tempo de prensa, reduziu a absorção de água, quando elevado de três para cinco minutos. Em contrapartida, os tempos de seis, sete e oito minutos, voltaram a aumentar a absorção e dez minutos obteve a menor de todos os tratamentos. Silva *et al.* (2006) também verificaram redução na absorção e inchamento de painéis particulados, prensados a 180° C quando elevado o período de prensagem de seis para oito minutos, no entanto, com dez minutos a absorção aumentou novamente. Ambos os trabalhos corroboram com o resultado verificado neste estudo, onde não foi possível identificar uma interferência contínua e progressiva do tempo de prensagem em ambas as propriedades.

Kord *et al.* (2015) testando três tempos de prensagem (cinco, seis e sete minutos) na produção de painéis aglomerados, com densidade nominal de 700 Kg.m³ e 15 mm de espessura identificaram redução progressiva na absorção e no inchamento em espessura. Esse mesmo comportamento também foi encontrado por Iwakiri *et al.* (2019) no ensaio de absorção de água trabalhando com painéis de partículas de *Pinus* com dois, quatro e seis minutos de prensagem. Para inchamento em espessura os autores não observaram tal comportamento.

Utilizando oito minutos de prensagem, Ferreira (2010) encontrou valores médios de inchamento em espessura após 24h entre 9,01% e 14,17% e absorção de água após 24h entre 31,01% e 51,42% em painéis MDF de *Pinus taeda*. Com o mesmo tempo de prensagem Ayrlmis (2012) obteve 23,7% de inchamento em espessura após 24 horas, trabalhando com painéis MDF de *Pinus* spp.

Quanto ao fator espessura, no ensaio de inchamento em espessura após 24h foi possível notar que até 100°C+4 min os painéis com menor espessura nominal tiveram valores médios estatisticamente superiores aos painéis de maior espessura. O mesmo foi constatado por Ribeiro (2015) produzindo painéis MDF com 12, 15 e 18 mm. O autor afirma que painéis com maior espessura tende a apresentar menor inchamento quando produzidos em iguais condições. Krzysik *et al.* (2001) encontrou valores médios de 11, 6 e 3 % de inchamento para as espessuras 6, 13 e 19 mm, respectivamente, em painéis MDF de *Eucalyptus saligna*.

Considerando o que estabelece a norma NBR 15316 (ABNT, 2019) para inchamento em espessura (24 horas), apenas os tratamentos T4, T5, T11, T12 e T13 atenderam o preconizado. Esse resultado permite indicar o tempo de 100°C+3 min como o mais satisfatório, em ambas as espessuras, mesmo que outros tratamentos tenham atendido norma e apresentem

menores valores médios. Visto que, atendida a norma, opta-se sempre pelo menor tempo, que irá refletir num menor gasto de energia e conseqüentemente menor custo.

Os valores médios de taxa de não retorno em espessura, tabela 13, mostram que houve diferença estatística somente para tempo de prensagem, onde os dois primeiros tempos (até atingir 100°C e 100°C+1 min) foram equivalentes e diferentes dos demais para ambas as espessuras.

Tabela 13 - Valores médios de taxa de não retorno em espessura – TNRE.

Tempo de prensagem	TNRE [%]	
	15 mm	18 mm
Até atingir 100 °C	T ¹ 13,20 _(5,44) Aa	T ⁸ 14,95 _(7,86) Aa
100 °C + 1 min	T ² 12,10 _(7,71) Aa	T ⁹ 13,13 _(7,05) Aa
100 °C + 2 min	T ³ 12,20 _(8,46) Ba	T ¹⁰ 12,32 _(8,75) Ba
100 °C + 3 min	T ⁴ 10,60 _(9,57) Ba	T ¹¹ 12,12 _(5,10) Ba
100 °C + 4 min	T ⁵ 11,21 _(9,86) Ba	T ¹² 11,41 _(6,11) Ba
100 °C + 5 min	T ⁶ 11,98 _(7,60) Ba	T ¹³ 11,97 _(6,23) Ba
100 °C + 6 min	T ⁷ 12,23 _(6,65) Ba	T ¹⁴ 12,25 _(9,76) Ba
Média	11,9	12,6

Legenda: Sobrescrito: tratamento. Subscrito: coeficiente de variação (%). Médias seguidas de mesma letra maiúscula na coluna não diferem estatisticamente entre si para tempo de prensagem dentro de uma mesma espessura; médias seguidas de mesma letra minúscula na mesma linha não diferem estatisticamente entre si para espessura dentro do mesmo tempo de prensagem, ambos pelo Teste de Scott-Knott a 5% de probabilidade de erro. Fonte: elaborado pelo autor (2020).

O comportamento encontrado ao longo do tempo de prensagem para TNRE é o mesmo do observado para absorção de água e inchamento em espessura. Silva *et al.* (2006) também notaram comportamento equivalente entre a TNRE e o inchamento em espessura trabalhando em painéis MDP. Mendes *et al.* (2014) também observaram relação direta entre essas propriedades, os autores justificam que isso ocorre devido a maior variação em espessura resultante da liberação das tensões de compressão, o qual se torna parcialmente irrecuperável, por isso os valores tendem ao mesmo comportamento.

Melo (2013) explica que quando ocorre o inchamento em espessura, dois processos físicos estão envolvidos, um relacionado a tensões de compressão e outro a própria natureza higroscópica do material lignocelulósico. Quando o painel incha, tende a liberar as tensões de

compressão, provenientes do processo de prensagem, o qual é um processo definitivo e irreversível.

França *et al.* (2016) produzindo painéis aglomerados a partir de fibras *oversize* residuais de uma indústria de MDF, e utilizando como parâmetros de prensagem, temperatura de 160°C, pressão de 40 kgf/cm² e ciclo de oito minutos, obtiveram 5,89% de TNRE, valor relativamente inferior ao verificado neste estudo. Enquanto Barnasky (2019) encontrou valor médio 14,31% para painéis MDF com 10 minutos de prensagem e 16 mm de espessura, resultado mais próximo deste estudo.

O melhor resultado para ambas as espessuras foi alcançado no tempo de 100°C+2 min, visto que os tratamentos com os menores valores de TNRE são estatisticamente equivalentes a partir deste tempo, optando dessa forma pelo menor tempo.

3.2 Propriedades mecânicas

3.2.1 Flexão estática

A tabela 14 apresenta os valores médios de módulo de ruptura (MOR) e elasticidade (MOE) no ensaio de flexão estática, onde pode ser observado um aumento nos valores médios com o aumento do tempo de prensagem para ambas as variáveis. Para MOR, o tempo mínimo de prensagem que atendeu a resistência mínima determinada pela NBR 15316 (ABNT, 2019) foi o de 100°C+2 min e 100°C+4 min para as espessuras de 15 mm e 18 mm respectivamente. Já para MOE, têm-se os tempos 100°C+3 min para 15 mm e 100°C+4 min para 18 mm para atendimento ao valor mínimo de rigidez.

Tabela 14 - Valores médios de MOR e MOE no ensaio de flexão estática.

Tempo de prensagem	Flexão estática			
	MOR [MPa]		MOE [MPa]	
	15 mm	18 mm	15 mm	18 mm
Até atingir 100 °C	T ¹ 18,96 _(4,45) Aa	T ⁸ 19,77 _(4,41) Ab	T ¹ 1878 _(06,94) Aa	T ⁸ 2104 _(00,24) Ab
100 °C + 1 min	T ² 18,99 _(4,95) Aa	T ⁹ 19,64 _(5,57) Ab	T ² 1927 _(02,49) Aa	T ⁹ 2163 _(16,31) Ab
100 °C + 2 min	T ³ 20,69 _(7,45) Ba	T ¹⁰ 19,05 _(6,41) Ab	T ³ 2048 _(07,71) Ba	T ¹⁰ 2190 _(12,76) Ab
100 °C + 3 min	T ⁴ 20,70 _(9,21) Ba	T ¹¹ 19,91 _(8,84) Ab	T ⁴ 2254 _(11,47) Ca	T ¹¹ 2114 _(08,09) Ab
100 °C + 4 min	T ⁵ 21,32 _(8,11) Ca	T ¹² 21,93 _(2,91) Ba	T ⁵ 2254 _(11,47) Ca	T ¹² 2327 _(03,88) Ba
100 °C + 5 min	T ⁶ 21,59 _(0,35) Ca	T ¹³ 22,76 _(2,29) Cb	T ⁶ 2374 _(03,51) Da	T ¹³ 2488 _(17,85) Cb
100 °C + 6 min	T ⁷ 22,10 _(1,43) Ca	T ¹⁴ 22,90 _(6,99) Cb	T ⁷ 2429 _(02,84) Da	T ¹⁴ 2537 _(14,35) Cb
Média	20,62	20,85	2166	2275
NBR 15316 (2019)	Mínimo 20 MPa		Mínimo 2.200 MPa	

Legenda: Sobrescrito: tratamento. Subscrito: coeficiente de variação (%). Médias seguidas de mesma letra maiúscula na coluna não diferem estatisticamente entre si para tempo de prensagem dentro de uma mesma espessura; médias seguidas de mesma letra minúscula na mesma linha não diferem estatisticamente entre si para espessura dentro do mesmo tempo de prensagem, ambos pelo Teste de Scott-Knott a 95% de probabilidade de erro. Fonte: elaborado pelo autor (2020).

Em relação a espessura, todos os painéis com 18 mm apresentaram valores médios de MOE superiores aos de 15 mm, com exceção do tempo 100°C+4 min, onde foram equivalentes.

Essa tendência de aumento na resistência e rigidez em maiores tempos de prensagem, pode ser explicado pelas densidades de pico localizadas próximas as superfícies, como pode ser visto, nas tabelas 9 e 10, onde os maiores tempos obtiveram as maiores densificações e os menores tempos valores inferiores. Belini, Tomazello Filho e Chagas (2009) explicam que as densidades máximas, denominada como pico de densidade, localizadas nas faces superior e inferior do painel, relacionam-se com o módulo de ruptura e elasticidade; os maiores valores de densidade nessas camadas indicam melhor fechamento/entrelaçamento das fibras, resultado da maior compactação da massa de fibras durante a prensagem e, por consequência maior resistência e rigidez.

Taheri *et al.* (2016) avaliaram a influência do tempo (dois, quatro e seis minutos) de prensagem e do teor de resina final após a prensagem nas propriedades de painéis MDF. Os resultados indicaram que o aumento do tempo de prensagem favoreceu a variável MOR e o teor de resina final, o que pode ter contribuído para a maior resistência. Além do teor de resina final,

os autores complementam que tempos mais curtos de prensagem proporcionam menor densificação das camadas superficiais, o que resulta em menores valores dessa resistência.

Alguns trabalhos com outros painéis reconstituídos como MDP, verificaram resultados que apresentam a mesma tendência observada no presente estudo, tanto para MOR, quanto para MOE, como Iwakiri *et al.* (2019), que constatou elevação no MOR (9,46 MPa, 9,72 MPa e 11,16 MPa, para dois, quatro e seis minutos de prensagem. Kord *et al.* (2015) com densidade nominal de 700 kg.m³ e 15 mm de espessura, encontraram valores também crescentes para o MOR (12,73 MPa 13,82 MPa e 14,51 MPa e para o MOE (1729, 1845 e 1933 MPa) com cinco, seis e sete minutos de prensagem, respectivamente.

Ashori e Nourbakhsh (2008) pesquisando o efeito do ciclo de prensagem nas propriedades de painéis MDP de *Eucalyptus camaldulensis*, com densidade nominal de 750 kg.m³ e 11% de resina UF; prensados à 160°C e pressão de 30 kg.cm⁻², obtiveram valores médios crescentes de MOE (1420, 1472 e 1688 N/mm²) para quatro, cinco e seis minutos de prensagem, respectivamente; corroborando com os resultados deste trabalho. Já o MOR não apresentou igual comportamento, onde o aumento de cinco para seis minutos culminou na redução desta resistência de 16,1 para 15,3 N/mm².

Campos (2005) avaliando as propriedades físico-mecânicas de painéis MDF de pinus e eucalipto, prensados por um período de oito minutos, obteve para a primeira espécie MOR de 26,3 MPa e MOE de 2682 MPa, enquanto que para segunda MOR de 25,7 MPa e MOE de 2613 MPa, ambos os resultados são compatíveis com os tratamentos de 100°C+6 min.

Quanto a variável espessura, nota-se que a maior espessura resultou em maior restência e rigidez. Pazetto, Del Menezzi e Gonzalez (2015) verificaram comportamento idêntico para ambos os módulos avaliando painéis MDF comerciais de *Pinus* spp. com as mesmas espessuras deste estudo.

3.2.2 Arrancamento de parafuso

Nos valores médios de arrancamento de parafuso de superfície e topo, apresentados na tabela 15, evidencia-se que o fator tempo de prensagem também influenciou positivamente nas variáveis. Pode-se separar em termos de diferença estatística para topo, três grupos distintos para as duas espessuras, de 100°C até 100°C+3 min, 100°C+4 min de forma isolada e entre 100°C+5 e 100°C+6 min, enquanto que para superfície, tem-se os mesmos três grupos, mas com tempos diferenciados, 100°C e 100°C+ 1, 100 °C+2 e 100°C+3 min e entre 100°C+4 e 100°C+6

min. Quanto a espessura, dentro de cada tempo de prensagem, os painéis com 18 mm foram superiores para as duas variáveis avaliadas

Tabela 15 - Valores médios de resistência ao arrancamento de parafuso.

Tempo de prensagem	Arrancamento de parafuso			
	Topo [N]		Superfície [N]	
	15 mm	18 mm	15 mm	18 mm
Até atingir 100 °C	T ¹ 881 _(13,97) Aa	T ⁸ 959 _(10,01) Ab	T ¹ 1067 _(14,00) Aa	T ⁸ 1241 _(20,05) Ab
100 °C + 1 min	T ² 898 _(19,63) Aa	T ⁹ 980 _(16,69) Ab	T ² 1110 _(18,76) Aa	T ⁹ 1216 _(12,18) Ab
100 °C + 2 min	T ³ 928 _(10,04) Aa	T ¹⁰ 963 _(12,10) Ab	T ³ 1114 _(07,76) Ba	T ¹⁰ 1341 _(21,86) Bb
100 °C + 3 min	T ⁴ 945 _(23,24) Aa	T ¹¹ 1083 _(8,50) Ab	T ⁴ 1237 _(09,56) Ba	T ¹¹ 1367 _(17,38) Bb
100 °C + 4 min	T ⁵ 1040 _(8,70) Ba	T ¹² 1177 _(14,19) Bb	T ⁵ 1371 _(11,69) Ca	T ¹² 1483 _(10,05) Cb
100 °C + 5 min	T ⁶ 1131 _(12,29) Ca	T ¹³ 1268 _(10,23) Cb	T ⁶ 1407 _(14,87) Ca	T ¹ 1492 _(14,29) Cb
100 °C + 6 min	T ⁷ 1183 _(14,40) Ca	T ¹⁴ 1339 _(18,48) Cb	T ⁷ 1414 _(20,37) Ca	T ¹⁴ 1555 _(8,67) Cb
Média	1001	1110	1246	1385

Legenda: Sobrescrito: tratamento. Subscrito: coeficiente de variação (%). Médias seguidas de mesma letra maiúscula na coluna não diferem estatisticamente entre si para tempo de prensagem dentro de uma mesma espessura; médias seguidas de mesma letra minúscula na mesma linha não diferem estatisticamente entre si para espessura dentro do mesmo tempo de prensagem, ambos pelo Teste de Scott-Knott a 5% de probabilidade de erro. Fonte: elaborado pelo autor (2020).

O tempo de prensagem interferiu estatisticamente, elevando a resistência ao arrancamento de parafuso tanto na superfície quanto no topo, quando aumentou-se o tempo de prensa. Este resultado é justificado pela maior eficiência de polimerização da resina nos maiores tempos, o que consequentemente resultou em maiores densidades nas faces (para arrancamento de superfície) e também no centro (para arrancamento de topo) nos maiores tempos. De acordo Maloney (1989) existe relação entre o perfil de densidade e as propriedades mecânicas, onde a densidade de centro refletirá no resultado de arrancamento de parafuso de topo e as densidades de pico no arrancamento de superfície.

Com oito minutos de prensagem França (2015) obteve valor médio de 1054,29 N para topo e 1592,36 N para superfície no ensaio de arrancamento de parafuso de painéis MDF *Pinus taeda* e *Pinus elliottii*. Belini *et al.* (2008) trabalhando com painéis MDF de *Eucalyptus grandis* com diferentes métodos de desfibramento, dois minutos e 35 segundos de prensagem a 195°C, encontraram valores que variaram de 1049,31 N a 1461,19 N para topo e 941,44 N a 1382,74

N para superfície. Já Barnasky (2019) utilizando doze minutos de prensagem para produção de painéis MDF de *Pinus* sp. encontrou valores inferiores ao deste estudo, resistência ao arrancamento de parafuso na superfície de 1211 N e 894 N no topo.

Embora a NBR 15316 (ABNT, 2017) não estabeleça valores mínimos para o a arrancamento de parafuso, empresas produtoras de MDF, se referem a 1000 N para superfície e 750 N para topo (GUARARAPES, 2020). Levando-se em consideração o especificado, todos os tratamentos atenderam os mínimos recomendados para ambos os ensaios.

3.2.3 Tração perpendicular

Os valores médios de tração perpendicular, apresentados na tabela 16, demonstram um aumento dessa propriedade com o aumento do tempo de prensagem, o que refletiu em diferença estatística entre os tratamentos, tanto na espessura de 15 mm, quanto na de 18 mm.

Tabela 16 – Valores médios de tração perpendicular.

Tempo de prensagem	Tração perpendicular [MPa]	
	15 mm	18 mm
Até atingir 100 °C	T ¹ 0,33 _(11,76) Aa	T ⁸ 0,31 _(16,92) Aa
100 °C + 1 min	T ² 0,45 _(17,21) Ba	T ⁹ 0,43 _(18,64) Ba
100 °C + 2 min	T ³ 0,51 _(12,25) Ba	T ¹⁰ 0,45 _(15,57) Bb
100 °C + 3 min	T ⁴ 0,60 _(6,84) Ca	T ¹¹ 0,49 _(13,44) Bb
100 °C + 4 min	T ⁵ 0,64 _(12,45) Ca	T ¹² 0,57 _(11,43) Ca
100 °C + 5 min	T ⁶ 0,66 _(9,74) Ca	T ¹³ 0,59 _(14,64) Ca
100 °C + 6 min	T ⁷ 0,68 _(4,20) Ca	T ¹⁴ 0,63 _(14,30) Ca
Média	0,55	0,50
NBR 15316 (ABNT, 2019)	Mínimo 0,55 MPa	

Legenda: Sobrescrito: tratamento. Subscrito: coeficiente de variação (%). Médias seguidas de mesma letra maiúscula na coluna não diferem estatisticamente entre si para tempo de prensagem dentro de uma mesma espessura; médias seguidas de mesma letra minúscula na mesma linha não diferem estatisticamente entre si para espessura dentro do mesmo tempo de prensagem, ambos pelo Teste de Scott-Knott a 5% de probabilidade de erro. Fonte: elaborado pelo autor (2020).

Os tratamentos com tempo de prensagem reduzido (até a camada central atingir 100°C), apresentaram valores médios bem inferiores aos demais, enquanto que, somente os tratamentos

com tempo acima de 100°C+3 min para 15 mm e 100°C+4 min para 18 mm, atenderam a resistência mínima de 0,55 MPa definido pela norma de referência. Para espessura dos painéis dentro de cada tempo de prensagem, somente houve diferença dentro do 100°C+2 min e 100°C+3 min, com superioridade de 15 mm.

O resultado crescente dessa propriedade em função do tempo de prensagem está diretamente associado aos valores da densidade do miolo, que podem ser visualizados nas tabelas 9 e 10, onde o aumento do tempo proporcionou maior densificação nesta região do painel e também a qualidade de cura da resina. De acordo com Wong *et al.* (1998), a tração perpendicular é afetada pela desuniformidade do gradiente de densidade do painel, onde os menores valores do perfil de densidade prejudicam esta propriedade em decorrência da ruptura ocorrer no ponto mais fraco da espessura, ou seja, no miolo do painel.

Vários estudos com painéis reconstituídos de madeira observaram a mesma tendência, como Saotome *et al.* (2012) que encontraram 0,70 MPa, 0,89 MPa e 0,97 MPa para quatro, seis e oito minutos de prensagem e temperatura de 170°C; e Eroglu, Ístek e Utsa (2001), que produzindo painéis MDF com 700 Kg.m³ de densidade nominal, também encontraram valores crescentes de tração perpendicular, 0,75MPa (cinco minutos) e 0,80 MPa (seis minutos). Park *et al.* (2001) com ciclos de cinco e sete minutos de prensagem, obtiveram 0,46 e 0,50 MPa, respectivamente, para produção de painéis MDF com 750 Kg.m⁻³ de densidade, prensados a temperatura de 205°C. Ainda no mesmo trabalho, utilizando uma resina com polimerização acelerada (fenol-formaldeído), verificam uma influência ainda mais acentuada do tempo de prensagem nos valores de ligação interna: 0,20 MPa, 0,60 MPa e 0,90 MPa, respectivamente, para 4, 4,5 e 5 minutos de prensagem.

No entanto, outros autores observaram tendência inversa, com tempos maiores de prensagem, como Salari *et al.* (2013) em dois tempos de prensagem, sete e dez minutos a 175°C, onde o aumento do tempo reduziu a tração perpendicular de 0,45 MPa para 0,41 MPa. Os autores atribuem essa redução a degradação parcial da resina curada, além de complementarem que compósitos a base de madeira quando submetidos a alta temperatura e baixo teor umidade, as tensões de compressão são transmitidas as células individuais da madeira, resultando em paredes celulares danificadas e consequente perda de resistência.

A mesma constatação de Salari *et al.* (2013), foi encontrada por Ayrilmis *et al.*(2011) com painéis MDF, onde temperaturas mais elevadas e tempos de prensagem muito longos afetaram negativamente a variável. Os autores atribuem esta queda a capacidade de umedecimento das fibras devido ao fechamento de microporos, o que afeta a penetração do

adesivo e também o umedecimento da parede celular, limitando a penetração de moléculas de resina maiores e, portanto, a resistência na linha de cola é reduzida.

Alguns trabalhos que visam a redução do tempo de prensagem vem sendo desenvolvidos com resultados positivos para tração perpendicular, a exemplo de Park *et al.* (2001) que através da utilização de fenol-formaldeído, uma resina de cura acelerada, proporcionou uma redução de 29% do tempo de prensagem e melhorou estatisticamente essa propriedade. Euring Kirsch e Kharazipour (2016) utilizando um processo de vapor quente, como pré-aquecimento do colchão de fibras, reduziu significativamente o tempo de prensagem de painéis MDF em 25%, além de melhorar a ligação interna dos painéis.

3.3 Correlação entre as propriedades avaliadas

A tabela 17 apresenta os coeficientes de correlação simples de Pearson. As maiores correlações significativas foram observadas entre MOR e MOE (0,83), arrancamento de parafuso de superfície e MOE (0,78), tração perpendicular e MOR (0,71) e absorção de água e inchamento em espessura (0,73). O aumento do tempo de prensagem contribuiu para a obtenção de correlações fortes e positivas entre as propriedades mecânicas, onde os maiores tempos resultaram nas maiores resistências e rigidez, enquanto que os menores tempos tiveram resultado inverso. Eleotério, Filho e Junior (2000) também obtiveram fortes correlações entre MOR e MOE (0,94), tração perpendicular e MOR (0,90) e absorção e inchamento em espessura (0,97) avaliando as propriedades de painéis MDF com diferentes massas específicas e teores de resina. Assim como Belini e Tomazello Filho (2010) com altas correlações entre MOR e MOE (0,81) e absorção e inchamento em espessura (0,90) produzindo painéis MDF de *Eucalyptus grandis*.

Tabela 17 – Coeficientes de correlação simples de Pearson entre as propriedades analisadas.

	D	RC	E	TU	AA	IE	TNRE	MOR	MOE	TP	APT	APS
D	1	0,19 ^{NS}	-0,30*	-0,30*	-0,41*	-0,23 ^{NS}	-0,23 ^{NS}	0,23 ^{NS}	0,21 ^{NS}	0,30*	0,17 ^{NS}	0,14 ^{NS}
RC		1	-0,04 ^{NS}	-0,21 ^{NS}	-0,18 ^{NS}	-0,24*	-0,09 ^{NS}	0,15 ^{NS}	0,13 ^{NS}	0,11 ^{NS}	0,26*	0,08 ^{NS}
E			1	0,03 ^{NS}	0,08 ^{NS}	-0,10 ^{NS}	0,18 ^{NS}	-0,04 ^{NS}	0,11 ^{NS}	-0,36*	0,15 ^{NS}	0,20 ^{NS}
TU				1	0,41*	0,27*	0,26*	-0,58*	-0,56*	-0,47*	-0,56*	-0,38*
AA					1	0,73*	0,44*	-0,55*	-0,58*	-0,60*	-0,36*	-0,55*
IE						1	-0,39*	-0,46*	-0,56*	-0,45*	-0,36*	-0,48*
TNRE							1	-0,22 ^{NS}	-0,24*	-0,34*	0,17 ^{NS}	-0,25*
MOR								1	0,86*	0,71*	0,64*	0,66*
MOE									1	0,66*	0,67*	0,78*
TP										1	0,39*	0,51*
AT											1	0,55*
AS												1

*Significativo ao nível de 5% de probabilidade de erro. ^{NS} = Não significativo. D = densidade; RC = razão de compactação; E = espessura; TU = teor de umidade; AA = absorção de água após 24 de imersão; IE = inchamento em espessura após 24 h de imersão; TNRE = taxa de não retorno em espessura; MOR= módulo de ruptura; MOE = módulo de elasticidade; TP = tração perpendicular; APT = arrancamento de parafuso no topo; APS = arrancamento de parafuso na superfície.

3.4 Propriedades tecnológicas X atendimento aos parâmetros de referência

As tabelas 18 e 19 apresentam o comportamento dos painéis nos diferentes tempos de prensagem, no que tange ao atendimento aos parâmetros estabelecidos pelos procedimentos e normas de referência. Para os painéis com 15 mm de espessura, observa-se que três tempos de prensagem atenderam todos os parâmetros, 100°C+3 min (5:18 min), 100°C+4 min (6:18 min) e 100°C+5 min (7:18 min), enquanto que para os painéis com 18 mm, somente o tempo de 100°C+4 min (6:52 min) seguiu o estabelecido.

Observa-se também, que os menores tempos não foram atendidos para ambas as espessuras devido ao comprometimento das propriedades de resistência e rigidez; já os maiores tempos de prensagem, prejudicaram a estabilidade dimensional, que foi referenciada por meio do ensaio de inchamento em espessura

Tabela 18 - Propriedades tecnológicas X parâmetros de referência - painéis 15 mm.

Tempo de prensagem	D	RC	TU	IE	MOR	MOE	TP
Até atingir 100 °C	X	X	X				
100 °C + 1 min	X	X	X				
100 °C + 2 min	X	X	X		X		
100 °C + 3 min	X	X	X	X	X	X	X
100 °C + 4 min	X	X	X	X	X	X	X
100 °C + 5 min	X	X	X	X	X	X	X
100 °C + 6 min	X	X	X		X	X	X

Legenda: D: densidade, RC: razão de compactação; TU: teor de umidade; IE: inchamento em espessura, MOR: módulo de ruptura; MOE: módulo de elasticidade; TP: tração perpendicular. Fonte: elaborado pelo autor (2020).

Tabela 19 - Propriedades tecnológicas X parâmetros de referência - painéis 18 mm.

Tempo de prensagem	D	RC	TU	IE	MOR	MOE	TP
Até atingir 100 °C	X	X	X				
100 °C + 1 min	X	X	X				
100 °C + 2 min	X	X	X				
100 °C + 3 min	X	X	X	X			
100 °C + 4 min	X	X	X	X	X	X	X
100 °C + 5 min	X	X	X		X	X	X
100 °C + 6 min	X	X	X		X	X	X

Legenda: D: densidade, RC: razão de compactação; TU: teor de umidade; IE: inchamento em espessura, MOR: módulo de ruptura; MOE: módulo de elasticidade; TP: tração perpendicular. Fonte: elaborado pelo autor (2020).

4 CONCLUSÃO

Os painéis de fibras do presente estudo, foram classificados como de média densidade, com alta razão de compactação, e com espessura e densidade dentro dos intervalos propostos.

O perfil de densidade encontrado, foi característico de painéis MDF, onde as suas densidades máximas foram encontradas próximas as camadas superficiais, sendo expostas após a calibração e lixamento. A diferença entre as densidades da superfície e da porção central foi em média de 50%; em relação a densidade média, as superfícies foram superiores em 31%, enquanto que porção central foi inferior em 12%.

A estabilidade dimensional dos painéis melhorou com o aumento do tempo de prensagem em até 100°C+4 min, que corresponde a 6:18 min para os painéis com 15 mm e 6:52 min para os painéis com 18 mm; a partir deste ponto, a absorção e o inchamento em espessura aumentaram.

Todas as propriedades de resistência e rigidez tiveram um aumento progressivo com o aumento do tempo de prensagem até o momento de retirada da pressão do colchão / painel, 100°C+6 min, que corresponde a 8:18 min para os painéis com 15 mm e 8:52 min para os painéis com 18 mm.

Os melhores tratamentos, que correspondem ao menor tempo mínimo para atender aos parâmetros de referência estabelecidos pela literatura e pela NBR 15316 (ABNT, 2019) foram 5:18 min (100°C+3 min) para a espessura de 15 mm e 6:52 (100°C+4 min) para a espessura de 18 mm.

5 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Determinar as propriedades tecnológicas dos painéis MDF com 750 kg.m^{-3} e espessuras de 15 e 18 mm, tendo como referência os tempos de prensagem determinados no primeiro capítulo;

Determinar a emissão de formaldeído nos painéis dos tratamentos que atingiram os parâmetros de referência.

Avaliar a transferência de calor na prensagem de painéis MDF ao longo da espessura (camadas) e também no sentido centro borda.

REFERÊNCIAS

- ALBUQUERQUE, C.E.C. de; IWAKIRI, S. Efeito da adição de água na evolução da temperatura no miolo de aglomerados durante o ciclo de prensagem. **Floresta**, v. 35, n. 1, p. 57-67, 2005.
- ASHORI, A.; NOURBAKHSB, A. Effect of press cycle time and resin content on physical and mechanical properties of particleboard panels made from the underutilized low-quality raw materials. **Industrial Crops Products**, v.28, p. 225-230, 2008.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 15316-2:2019**: Painéis de fibras de média densidade Parte 2: Requisitos e métodos de ensaio. Rio de Janeiro, 2019. 95 p.
- AYRILMIS, N. Effect of panel density on dimensional stability of medium and high density fiberboards. **Journal of Materials Science**. v.42, p. 8551-8557, 2007.
- AYRILMIS, N. Enhancement of dimensional stability and mechanical properties of light MDF by adding melamine resin impregnated paper waste, **International Journal of Adhesion and Adhesives**, v. 33, p. 45-49, 2012.
- AYRILMIS, N.; JARUSOMBUTI, S.; FUEANGVIVAT, V.; BAUCHONGKOL, P. Effects of thermal treatment of rubberwood fibres on physical and mechanical properties of medium density fibreboard. **Journal of Tropical Forest Science**, v. 23, n. 1, p. 10-16, 2011.
- BARNASKY, R. R. S. **Influência da incorporação de um compósito com matriz de polietileno de alta densidade nas propriedades mecânicas tecnológicas de painéis de fibras de média densidade**. 2019. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Curso de Pós-graduação em Engenharia Florestal, Centro de Ciências Agroveterinárias, Universidade do Estado de Santa Catarina, Lages, 2019.
- 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**, v. 20, n. 3, p. 493-500, 2010.
- BELINI, U. L.; TOMAZELLO FILHO, M.; CHAGAS, M. P. Densitometria de raios X aplicada na avaliação tecnológica de painéis MDF de eucalipto. **Scientia Forestalis**, v. 37, n. 84, p. 343-350, 2009.
- BELINI, U. L.; TOMAZELLO FILHO, M.; CHAGAS, M. P.; DIAS, C. T. S.; Efeito do desfibramento da madeira de *Eucalyptus grandis* na morfologia das fibras e propriedades de painéis MDF. **Cerne**, v. 14, n. 3, p. 227-233, 2008.
- BUFALINO, A.L.; PROTÁSIO, T. P.; CÉSAR, A. A. S.; SÁ, V.A.; MENDES, L.M. Modelagem de propriedades físicas e mecânicas em painéis aglomerados de cedro australiano. **Floresta e Ambiente**, v. 19, n. 2, p. 243-249, 2012.
- CAI, Z.; MUEHL, J. H.; WINANDY, J. E. Effects of panel density and mat moisture content on processing medium density fiberboard. **Forest Products Journal**, v. 56, n. 10, out. 2006.
- CAMPOS, C. I. **Produção e caracterização físico-mecânica de MDF a partir de fibras de madeira de reflorestamento e adesivos alternativos em diferentes teores**. 2005. Tese

(Doutorado em Ciências e Engenharia de Materiais). Escola de Engenharia de São Carlos/Institutos de Física, Química de São Carlos. Universidade de São Paulo-USP, 2005.

CAMPOS, C. I.; LAHR, F. A. R. MDF: processo de produção, propriedades e aplicações. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA E CIÊNCIA DOS MATERIAIS, 2002, Natal. **Anais**. Natal: UFRN, 2002. p. 2054-2059.

CARVALHO, L. H.; COSTA, C. Modelling and simulation of the hot pressing process in the production of medium density fibreboard (MDF). **Chemical Engineering Communications**. v.170, p.1-21, 1998.

CARVALHO, L.M.H.; COSTA, M. R.N.; COSTA, C.A.V.; A global model for the hot-pressing of MDF. **Wood Science Technology**. v. 37, p. 242-258, 2003.

ELEOTÉRIO, J. R.; TOMAZELLO FILHO, M.; BORTOLETTO JUNIOR, G. Propriedades físicas e mecânicas de painéis MDF de diferentes massas específicas e teores de resina. **Ciência Florestal**, v. 10, n. 2, p. 75-90, 2000.

EROĞLU, H.; İSTEK, A.; USTA, M. Medium density fiberboard (MDF) manufacturing from wheat straw (*Triticum aestivum* L.) and straw wood mixture. **Journal of Engineering Sciences**. v. 7, n 2, p. 305-311, 2001.

EURING, M.; KIRSCH, A.; KHARAZIPOUR, A. Pre-pressing and pre-heating via hot-air/hot-steam proces for production of binderless Medium-Desnsity Fibersboards. **BioResources**, v. 11, n. 3, p. 6613-6624, 2016.

FERREIRA, E. S. **Propriedades físico-mecânicas de painéis de fibras de média densidade (MDF) produzidos com resinas convencionais e modificadas com tanino de acácia negra**. 2010. Tese (Doutorado em Ciências Florestais) – Curso de Pós-graduação em Engenharia Florestal, setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2010.

FRANÇA, M. C. **Produção de painéis aglomerados de fibras oversize de uma indústria de MDF**. 2015. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Curso de Pós-graduação em Engenharia Florestal, Centro de Ciências Agroveterinárias, Universidade do Estado de Santa Catarina, Lages, 2015.

FRANÇA, M.C.; CUNHA, A. B.; TRIANOSKI, R.; SCHIMALSKI, M. B.; RIOS, P. A. Produção de painéis aglomerados homogêneos a partir de fibras *oversize* residuais de uma indústria de MDF. **Scientia Forestalis**, v. 44, n. 111, p. 665-674, 2016.

GRUBERT, W. **Utilização de partículas de bambu (*Phyllostachys edulis* e *Phyllostachys bambusoides*) como reforço em compósito de madeira**. 2016. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Curso de Pós-graduação em Engenharia Florestal, Centro de Ciências Agroveterinárias, Universidade do Estado de Santa Catarina, Lages, 2016.

GUARARAPES. MDF de Pinus: quais são as vantagens na produção dos móveis? 2018. Disponível em: <[MDF de Pinus: quais são as vantagens na produção dos móveis?](http://MDF de Pinus: quais são as vantagens na produção dos móveis? (guararapes.com.br))> . Acesso em: 24 Jul. 2020.

GUPTA, A.; JORDAN, P.J.; PANG, S.; CHAPMAN, K. M. Modelling of hot pressing of MDF. Wood Technology Research, Departamento f chemical & Process Engineering, University of Canterbury, Christchurch, New Zealand, 2006.

HUMPHREY, P. E. Physical aspects of wood particleboard manufacture. PhD Thesis. University College of North Wales, Bangor, UK. 1982.

IWAKIRI, S.; TRIANOSKI, R.; ROSA, T. S.; COSTA, L.S.S. Effects of temperature and pressure time in the manufacture of particlesboards. **Floresta**, v.49, n.3, p. 383-390, 2019.

JIN, J.; DAI, C.; HSU, W.E; YU, C. Properties of strand boards with uniform and conventional vertical density profiles. **Wood Science and Technology**, v.43, p.559-574, 2009.

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, p. 66, 1977.

KOLLMANN F. F. P.; KUENZI, E. W.; STAMM, A. J. Principles of wood science and technology II. Wood based materials, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 1975.

KORD, B.; ROOHANI, M.; KORD, B. Nocellulosic resource for particleboard production. **Maderas, Ciencia y tecnologia**, v. 17, n. 3, p. 517-524, 2015.

KRZYSIK, A. M.; MUEHL, J.H.; YOUNGQUIST, J.A.; FRANCA, F.S. Medium densisty fiberboard made from *Eucalyptus saligna*. **Forest Products Journal**, v. 5, n. 10, p. 47-50, 2001.

LI, K. On determining density and specific heat of New Zealand medium density fiberboard. **Procedia Engineering**. v. 62, p. 769-777, 2013.

LIMA, F. O.; SILVA, L. C. L.; CAMPOS, C. I.; CHRISTOFORO, A. L.; LAHR, A. R. Influência do tempo de prensagem em propriedades físicas e mecânicas de painéis MDP. **Scientia Forestalis**, v. 46, n. 119, p. 387-393, 2018.

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

MALONEY, T. M. **Modern particleboard and dry-process fiberboard manufacturing**. 2.ed. São Francisco: Miller Freeman, p. 689, 1993.

MATOS, J. L. M. **Ciclo da prensa em chapas de partículas estruturais Waferboards**. 1988. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Curso de Pós-graduação em Ciências Florestais, setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 1988.

MELO, R. R. Estabilidade dimensional de compostos de madeira. **Ciência da Madeira**, v. 4, n. 2, p. 152-175, 2013.

MENDES, L. M.; IWAKIRI, S.; MATOS, J. L. M.; JUNIOR, S. K.; SALDANHA, L.K. Pinus spp. na produção de painéis de partículas orientadas (OSB). **Ciência Florestal**, v. 12, n. 2, p. 135-145, 2002.

MENDES, R.F.; MENDES, L. M.; MENDONÇA, L. L.; JUNIOR, J. B. G.; MORI, F.A. Qualidade de painéis aglomerados homogêneos produzidos com a madeira de clones de *Eucalyptus urophylla*. **Cerne**, v. 20, n. 2, p. 329-336, 2014.

MENDES, L. M.; SILVA, G. A.; TRUGILHO, P. F.; SALDANHA, L. K.; MORI, F.A.; PÁDUA, F. A. Influência do teor de resina, temperatura e tempo de prensagem na umidade de equilíbrio de painéis de partículas de madeira. **Cerne**, v. 12, n. 4, p. 329-335, 2006.

MOSLEMI, A. A. **Particleboard**. London: Southern Illinois University Press, p. 245, 1974.

NEMLI, G. Factors affecting the production of E1 type particleboard. **Turkish journal of agriculture and forestry**. v. 26, p. 31-36, 2002.

PARK, B.D.; RIELD, 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**, v. 35, p. 311-323, 2001.

PAZETTO, V. M. F.; DELMENEZZI, C. H. S.; GONÇALEZ, J. C. Efeito da espessura e do vão na deformação em flexão estática de painéis de madeira. **Cerne**, v. 21, n. 4, p. 617-624, 2015.

RIBEIRO, V. C. N. **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**. 2015. Dissertação (Mestrado) – Curso de Pós-graduação em Recursos Florestais, Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2015.

SALARI, A.; TABARSA, T.; KHAZAEIAN, A.; SARAEIAN, A. Improving some of applied properties of oriented strand board (OSB) made from underutilized low quality paulownia (*Paulownia fortunei*) wood employing nano-SiO₂. **Industrial Crops Products**, v. 42, p. 1-9, 2013.

SANCHES, F. L.; HILLIG, E.; IWAKIRI, S.; NAPOLI, L. M. Resistência de painéis aglomerados produzidos com mistura de madeira de espécies florestais tradicionais e não tradicionais. **Ciência Florestal**, v. 26, n. 2, p. 559-569, 2016.

SAOTOME, H.; KORAI, H.; IIDA, T.; HAMANO, T.; KAWARDA, K.; OHMI, M. Performance of particleboard manufactured using air-injection press I: effects of air-injection press on preventing blowout of board manufactured from low-moisture particles. **Journal of Wood Science**, v. 58, p. 423-428, 2012.

SILVA, D. W.; FARRAPO, C. L. RIBEIRO, D.P.; MENDES, R.F. MENDES, L. M.; SCOLFORO, J. R.S. MDP com partículas de eucalipto e palha de milho. **Scientia Forestalis**, v. 43, n. 108, p. 853-862, 2015.

SILVA, R. L.; FILHO, J. V. F.; CRUZ, C. C. S. Simulação numérica da transferência de calor na madeira Gombeira. **Mundi**, v. 3, n. 2, p. 1-15, 2018.

SILVA, G. A. S. MENDES, L. M. TRUGILHO, P. F.; MORI, F.A.; SANTOS, I. F.; PÁDUA, F. A. Efeito de algumas variáveis de processamento nas propriedades físicas e de painéis de madeira de partículas alongadas. **Ciência Florestal**, v. 16, n. 1, p. 51-60, 2006.

TAHERI, F.; ENAYATI, A. A.; PIZZI, A.; LEMONON, J.; LAYEGHI, M. Evaluation of UF resin content in MDF boards after hot-pressing by Kjeldahl method. **European Journal of Wood and Wood Product**, v. 74, p. 237-242, 2016.

TOMAZELLO FILHO, M.; BELINI, U.G.; OLIVEIRA, J.T.S.; GONÇALVES, F.G. Avaliação tecnológica da madeira e de painéis MDF de eucalipto por densitometria de raios X. **Madeira: Arquitetura & Engenharia**, v. 11, n. 27, p. 45-58, 2010.

TORQUATO, L. P.; IWAKIRI, S.; BONDUELLE, G. M.; ALBUQUERQUE, C. E. C.; MATOS, J. L. M. Avaliação das propriedades físicas e mecânicas de painéis de fibras de média densidade (MDF) produzidos pelas indústrias brasileiras. **Floresta**, v. 40, n. 2, p. 275-280, 2010.

TRIANOSKI, R. **Avaliação do potencial de espécies florestais alternativas, de rápido crescimento, para produção de painéis de madeira aglomerada**. 2010. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Curso de Pós-graduação em Engenharia Florestal, setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2010.

VITAL, B. R.; LEHMAN, B.; BOONE, R.S. How species and board densities affect properties of exotic hardwood particleboards. **Forest Products Journal**, v. 24, n. 12, p. 37-45, 1974.

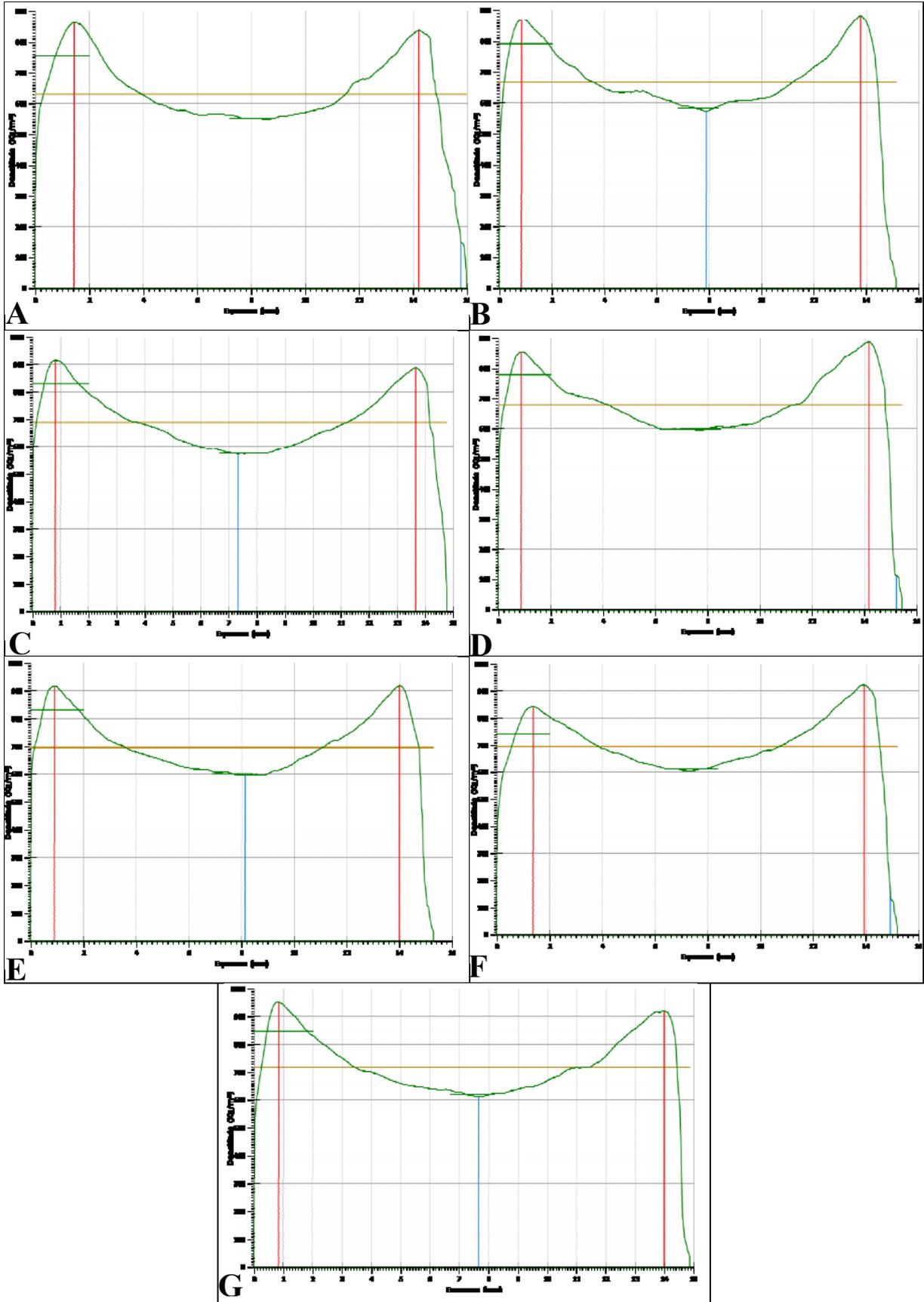
WEBER, C. **Estudos sobre viabilidade de uso de resíduos de compensados, MDF e MDP para produção de painéis aglomerados**. 2011. 90 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Curso de Pós-graduação em Engenharia Florestal, setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2011.

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

WONG, E.-D.; ZHANG, M.; WANG, Q.; KAWAI, S. Formation of the density profile and its effects on the properties of particleboard. **Wood Science and Technology**, v. 33, n. 4, p. 327–340, 1999.

APÊNDICE A

Figura 7 - Perfil de densidade dos painéis com 15 mm de espessura. (A) até atingir 100°C; (B) até atingir 100°C+1 min; (C) até atingir 100°C+2 min; (D) até atingir 100°C+3 min; (E) até atingir 100°C+4 min; (F) até atingir 100°C+5 min; (G) até atingir 100°C+6 min.



APÊNDICE B

Figura 8 - Perfil de densidade dos painéis com 18 mm de espessura. (A) até atingir 100°C; (B) até atingir 100°C+1 min; (C) até atingir 100°C+2 min; (D) até atingir 100°C+3 min; (E) até atingir 100°C+4 min; (F) até atingir 100°C+5 min; (G) até atingir 100°C+6 min.

