

**CENTRO ESTADUAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA PAULA SOUZA
FACULDADE DE TECNOLOGIA DE BOTUCATU
CURSO SUPERIOR DE TECNOLOGIA EM AGRONEGÓCIO**

GABRIELA VICENTE DE OLIVEIRA

**AVALIAÇÃO DO MÓDULO DE RUPTURA DE PAINÉIS DE PARTÍCULAS DE
MADEIRA COM O USO DE RESÍDUOS QUÍMICOS INDUSTRIAIS**

Botucatu-SP
Junho-2014

**CENTRO ESTADUAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA PAULA SOUZA
FACULDADE DE TECNOLOGIA DE BOTUCATU
CURSO SUPERIOR DE TECNOLOGIA EM AGRONEGÓCIO**

GABRIELA VICENTE DE OLIVEIRA

**AVALIAÇÃO DO MÓDULO DE RUPTURA DE PAINÉIS DE PARTÍCULAS DE
MADEIRA COM O USO DE RESÍDUOS QUÍMICOS INDUSTRIAIS**

Orientador (a): Prof.^a Dr.^a Fernanda Cristina Pierre

Relatório de Iniciação Científica apresentado à
FATEC – Faculdade de Tecnologia de
Botucatu, como exigência para cumprimento
do Trabalho de Conclusão de Curso no Curso
Superior de Tecnologia em Agronegócio.

Botucatu-SP
Junho-2014

DEDICATÓRIA

Aos meus pais, Neusa Gomes Vicente e Uiraci de Oliveira, e à minha irmã Carolina Vicente de Oliveira, pelo amor, pela dedicação e pelos ensinamentos que fazem parte da minha história.

AGRADECIMENTOS

À Faculdade de Tecnologia de Botucatu pela oportunidade de realização deste trabalho e a todos os professores que contribuíram para a minha formação.

À Prof.^a Dr.^a Fernanda Cristina Pierre pela força e orientação no desenvolvimento deste trabalho.

À Prof.^a Dr.^a. Gislaine Cristina Batistela pela paciência, força, orientação e ajuda nas análises estatísticas.

À Faculdade de Ciências Agrônômicas (FCA) – UNESP – Botucatu/SP pelo acolhimento e generosidade.

Ao Professor Alcides Lopes Leão e aos colegas do Laboratório de Resíduos Sólidos e Compósitos (RESIDUALL) pelo acolhimento, pela disponibilidade e pelos ensinamentos transmitidos.

Ao Humberto Fabrizzi de Figueiredo Pupo pela generosa e incansável ajuda em todos os momentos de realização deste trabalho, sendo de primordial importância para a realização do mesmo.

Ao técnico Carlos Roberto pela ajuda laboratorial.

Às minhas amigas de turma: Juliana Trancho Meira, Michele Reche Nascimento e Stéfani Laureano da Silva pelo companheirismo e grandes momentos que passamos juntas nesses anos de Faculdade.

À minha querida amiga Andréia Soares Gonçalves pelo companheirismo e amizade.

À minha família, em especial à minha mãe, Neusa, por sempre me ajudar, incentivar, apoiar e acreditar na minha graduação.

A todos de uma forma geral, muito obrigada.

RESUMO

O presente trabalho foi conduzido no Laboratório de Resíduos Sólidos e Compósitos (RESIDUALL) do Departamento de Recursos Naturais - Ciências Ambientais, da Faculdade de Ciências Agronômicas (FCA) - Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho (UNESP), Campus de Botucatu/SP. O referido trabalho teve como objetivo fabricar e avaliar o desempenho mecânico de módulo de ruptura (MOR) de painéis de partículas de madeira confeccionados com diferentes proporções de madeira e sólidos granulares de resíduos químicos industriais provenientes de uma empresa de painéis de madeira aglomerada, localizada em Botucatu/SP, utilizando como agente aglomerante resina ureia-formol (RUF). As proporções entre sólidos granulares de resíduos químicos industriais e partículas de madeira empregadas foram 0/100, 5/95 e 10/90. O desempenho mecânico dos painéis foi avaliado por meio da determinação da flexão estática, obtendo-se os valores de Módulo de Ruptura (MOR). Os resultados demonstraram que os painéis, de uma forma geral, tiveram um bom desempenho.

PALAVRAS-CHAVE: Módulo de ruptura. Painéis de partículas de madeira. Resíduos químicos industriais.

LISTA DE FIGURAS

Figura	Página
1	Painel de partículas de madeira 14
2	Madeira da camada interna 24
3	Madeira da camada externa 24
4	Resíduo químico industrial 24
5	Moinho granulador 25
6	Degradação do painel..... 28
7	Homogeneizador 29
8	Mistura antes da homogeneização 30
9	Mistura após homogeneização 30
10	Pesagem dos materiais 30
11	Medidor de umidade 31
12	Colchão pré-moldado..... 31
13	Colchão pré-moldado..... 32
14	Prensa hidráulica..... 32
15	Prensagem do colchão 33
16	Resfriamento do painel 33
17	Painel pronto para ser mapeado 34
18	Corte dos corpos de prova 35
19	Corte dos corpos de prova 35
20	Máquina universal de ensaios 36
21	Ensaio de flexão estática..... 37

LISTA DE TABELAS

Tabela		Página
1	Composição dos três tratamentos	26
2	Quantidade (gramas) e porcentagem de material na fabricação de um painel	27
3	Massa dos painéis antes da prensagem	39
4	Teores de umidade das camadas interna e externas antes da prensagem	40
5	Massa final, espessura, volume e densidade final dos painéis, segundo tratamento	41
6	Média e desvio padrão da densidade básica, segundo tratamento	41
7	Valores médios do MOR, segundo tratamento	42

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS

FF - FENOL-FORMALDEÍDO

MDF - PAINÉIS DE MÉDIA DENSIDADE

MDP - PAINÉIS DE PARTÍCULAS DE MÉDIA DENSIDADE

MOR - MÓDULO DE RUPTURA

RUF - RESINA URÉIA-FORMOL

UF - UREIA - FORMALDEÍDO

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	9
1.1 Objetivo	9
1.2 Justificativa e relevância do tema	10
2 REVISÃO DE LITERATURA	11
2.1 Madeira	11
2.2 Painéis de partículas de madeira.....	12
2.2.1 Processo de produção de painéis de partículas de madeira.....	14
2.3 Resina.....	16
2.4 Parafina	17
2.5 Estrutura do colchão e geometria das partículas	17
2.6 Prensa aquecida	18
2.7 Resíduos industriais.....	19
2.8 Resíduos das indústrias de base vegetal	21
2.9 Propriedades mecânicas.....	22
2.9.1 Resistência a flexão estática	22
2.9.1.1 Módulo de ruptura (MOR).....	22
3 MATERIAL E MÉTODOS	23
3.1 Matérias-primas utilizadas na fabricação de partículas de madeira	23
3.1.1 Madeira e resíduos químicos industriais	24
3.2 Fabricação dos painéis	25
3.2.1 Testes piloto.....	27
3.2.1.1 Temperatura de prensagem.....	27
3.2.1.2 Tempo de prensagem	27
3.2.1.3 Pressão de prensagem	28
3.2.2 Mistura das partículas.....	29
3.2.3 Formação do colchão e termoformagem por compressão	31
3.3 Ensaios mecânicos em corpos de provas dos painéis.....	34
3.3.1 Flexão Estática	35
3.3.1.1 Determinação da resistência à flexão e módulo de elasticidade	36
3.3.1.2 Procedimento	36
3.4 Delineamento estatístico e análises.....	38
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	39
4.1 Caracterização dos painéis de partículas de madeira	39
5 CONCLUSÃO	43
REFERÊNCIAS	44

1 INTRODUÇÃO

A preservação do meio ambiente está no centro das discussões, nos contextos mundial, nacional e regional, em conferências e congressos que tratam da sustentabilidade do planeta e, conseqüentemente, da sustentabilidade humana na terra, visando à manutenção dos recursos naturais para o abastecimento de uma população em elevado crescimento.

O atual consumo de madeira em grande escala, pelos diversos setores da sociedade, faz com que existam discussões e questionamentos sobre os impactos dos resíduos madeireiros e químicos ao ecossistema, influenciando a ciência florestal no desenvolvimento de pesquisas sobre soluções dos impactos ambientais gerados nos processos produtivos nos quais a matéria-prima madeira é o principal componente do processo.

Os resíduos madeireiros e químicos possuem potencial econômico viável ainda pouco explorado pelas empresas. A alternativa de seu aproveitamento na produção de novos painéis de partículas é uma ideia favorável à adoção de materiais que provoquem o mínimo impacto ambiental possível ao planeta.

1.1 Objetivo

Este trabalho teve como objetivo fabricar e avaliar a propriedade mecânica de Módulo de Ruptura (MOR), por meio da determinação da flexão estática, de painéis de partículas de madeira confeccionados com diferentes proporções de madeira e sólidos granulares de

resíduos químicos industriais utilizando como agente aglomerante a resina ureia-formol (RUF).

1.2 Justificativa e relevância do tema

A ideia inicial do trabalho é fornecer uma alternativa de reaproveitamento de resíduos químicos industriais, visando a questão da sustentabilidade ambiental e, em contrapartida, a redução dos custos para a indústria quanto à destinação destes resíduos, mostrando, por meio dos resultados do Módulo de Ruptura (MOR), que o uso dos painéis de partículas de madeira fabricados com resíduos químicos industriais é uma alternativa viável para as indústrias do setor.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Madeira

De acordo com Lara Palma (2009), a matéria-prima empregada para a fabricação de painéis de partículas de madeira é variável, podendo ser: toretes de pequeno diâmetro (com e sem casca), resíduos provenientes do manejo florestal, resíduos provenientes da transformação mecânica da madeira (sobras de serrarias - serragem, refugos, entre outros; sobras da indústria de compensados - lâminas, entre outros; sobras de madeira gerada de superfícies secas - maravalhas e refugos das indústrias de móveis, entre outros.) e resíduos de culturas agrícolas.

Dentre as propriedades da madeira, a densidade é a que mais requer monitoramento no recebimento da madeira para o processamento, pois está diretamente relacionada a parâmetros importantes do processo como, por exemplo, a compressibilidade do painel, ou seja, a pressão exercida pela prensa, e a quantidade de cola a ser empregada, permanentemente ajustada para garantir boa adesão interna ao painel (PIERRE, 2010).

2.2 Painéis de partículas de madeira

Os painéis de partículas de madeira foram desenvolvidos durante a Segunda Guerra Mundial na Alemanha, devido aos problemas de indisponibilidade de madeira de boa qualidade para produção de painéis. Logo em seguida, a produção foi paralisada em decorrência da indisponibilidade de matéria-prima para a produção de resina, tendo em vista a competição por petróleo para fins militares. Deste modo, foi necessário procurar fontes de matéria-prima, como resíduos de madeira, para produção de painéis de partículas de madeira como alternativa para suprir a demanda por painéis compensados (PIERRE, 2010). Após a guerra, a produção de painéis foi retomada pelos Estados Unidos, com aperfeiçoamento de equipamentos e processos produtivos.

No Brasil, a produção de painéis de partículas de madeira teve início em 1966, em Curitiba, no estado do Paraná, pela Placas do Paraná S.A (SÁ, 2009).

Na condição de um produto novo no mercado brasileiro, o painel de partículas de madeira passou por períodos de questionamentos, principalmente quanto às limitações técnicas, como alta absorção de água e inchamento em espessura e problemas quanto à fixação de parafusos. No decorrer do tempo foram incorporadas novas tecnologias, como o uso da parafina, controle de gradiente de densidade e sistemas de parafusamento mais eficientes, visando minimizar tais problemas (MENDONÇA, 2008).

Com relação aos principais usos e aplicações, o painel de partículas de madeira atende a uma demanda diversificada nos ramos da construção civil, indústria moveleira, embalagens, entre outros (WEBER, 2011).

Conforme Chagas, Gonçalves e Mattos (2008) o painel de partículas de madeira é uma chapa fabricada com partículas de madeira aglutinadas por meio de resinas, com ação de calor e pressão. Como matéria-prima, no mundo, são empregados: resíduos industriais de madeira; resíduos da exploração florestal; madeiras de qualidade inferior, não industrializáveis de outra forma; madeiras provenientes de florestas plantadas e reciclagem de madeira sem serventia. No Brasil, a madeira de florestas plantadas, em especial de eucalipto e de pinus, constitui a principal fonte de matéria-prima.

A partir da metade da década de 1990, as empresas brasileiras investiram em modernização tecnológica, passando do processo de prensagem cíclica para prensagem contínua, o que conferiu ao produto melhores características de resistência e implementaram a modificação da nomenclatura para MDP (*Medium Density Particleboard*), ou painel de

partículas de média densidade, numa tentativa de dissociar o novo produto do aglomerado tradicional (LESSMANN, 2008).

Os painéis de partículas de madeira são os mais consumidos no mundo. Individualmente, os principais países consumidores são os Estados Unidos (32%), a Alemanha (10%) e a China (7%). A produção mundial de painéis alcançou 99,7 milhões de m³, em 2005, destacando-se como maior produtor os Estados Unidos, responsável por 21% deste volume. O Brasil ficou em nono lugar, com 2% do volume fabricado no mundo. O comércio mundial de painéis movimentou US\$ 7 bilhões, cerca de 29 milhões de m³, sendo responsável por cerca de 30% do consumo global de painéis de partículas de madeira. A Europa concentra metade das transações realizadas. A comercialização ocorre, preferencialmente, entre regiões próximas, dado que o preço do painel de partículas de madeira não suporta valores de fretes para grandes distâncias. A Europa é a principal região exportadora, enquanto a Ásia é a principal importadora. Os Estados Unidos são o maior país importador, com 36% do volume, enquanto que o Canadá é o maior exportador, tendo movimentado 34% do volume exportado. O Canadá merece destaque na condição de importador líquido de painéis do continente asiático, que, em 2005, importou 4,5 milhões de m³ e exportou 2,6 milhões de m³. A China foi responsável pela importação líquida de 841 mil m³ e seus fornecedores tradicionais são os países da Europa (CHAGAS; GONÇALVES; MATTOS, 2008).

No período de 1996 a 2000, a produção brasileira de painéis de partículas de madeira evoluiu de 1.059 m³ para 1.762 m³, o que representa um crescimento médio anual de 13,6%, bastante superior à taxa mundial de 5,8%. Em 2001, a produção brasileira foi de 1.833 m³, sendo 4% maior que a do ano anterior. Esse crescimento está associado à necessidade de substituição do uso de madeira maciça na indústria moveleira e na construção civil face à escassez de oferta, evolução tecnológica que permitiu melhor usinagem dos painéis e a melhoria da percepção do consumidor final sobre a qualidade do particulado de madeira (BNDES, 2004). O mercado de chapas de partículas se destina ao uso industrial (embalagens, pallets, container, móveis, partes de veículos e artefatos elétricos), uso estrutural na construção civil (forros, divisórias, pisos, fôrmas e caixas de concreto, paredes internas e externas, entre outros.) ou ainda para confecção de brinquedos, prateleiras e usos domésticos. Em geral, a densidade dos painéis de partículas de madeira produzidos no Brasil varia de 0,40 a 0,80 g/cm³, confeccionados em prensas contínuas e descontínuas. As indústrias brasileiras de painéis utilizam principalmente madeira em toletes provenientes de espécies de rápido crescimento (CHAGAS; GONÇALVES; MATTOS, 2008).

Inúmeras são as vantagens ao se utilizar os painéis de partículas de madeira em relação à utilização da madeira em seu estado natural, uma vez que as dimensões dos painéis não estão relacionadas às dimensões da árvore e à qualidade da madeira. Existe também a possibilidade de se eliminar muitos defeitos provenientes da anatomia da árvore, conferindo ao produto final maior homogeneidade (MENDONÇA, 2008).

Na fabricação de painéis de partículas de madeira pode-se agregar valor a materiais de baixa aceitação e que seriam descartados, como por exemplo: resíduos de serrarias e desbastes, troncos e caules de árvores de pequeno porte, materiais inorgânicos como borracha de pneus, embalagens de garrafas polietileno tereftalato (PET) e embalagens do tipo tetrapak.

No caso específico do Brasil, onde existe grande disponibilidade de florestas plantadas de *Eucalyptus* e tendo em vista a demanda pela madeira de *Pinus*, torna-se importante o aproveitamento de madeira de *Eucalyptus* na produção de painéis de partículas de madeira (MENDONÇA, 2008).

2.2.1 Processo de produção de painéis de partículas de madeira

O painel de partículas de madeira (Figura 1) é constituído por partículas de madeira sobrepostas e cruzadas entre si, as quais são unidas por resinas, por meio da aplicação de pressão e calor (WEBER, 2011).

Figura 1 – Painel de partículas de madeira



Fonte: Lessmann, 2008.

As partículas utilizadas na fabricação do painel variam de 0,1 mm a 10 mm de comprimento e a vantagem é utilizar madeira reciclada, restos de galhos, até mesmo cascas e resíduos agrícolas (LESSMANN, 2008).

As partículas são obtidas pela trituração da madeira e são classificadas em dois tamanhos principais: as partículas maiores são usadas para compor a camada interna do painel, enquanto que as partículas menores são utilizadas para compor as duas camadas externas do painel (WEBER, 2011).

Após a secagem até a umidade desejada, as partículas recebem o adesivo. O principal adesivo usado é feito à base de resinas ureia-formol. A aplicação do adesivo é feita por meio de “encoladeiras”, que são equipamentos em forma de tambores cilíndricos, dotados de agitação mecânica interna por meio de pás, nos quais a madeira particulada é misturada com o adesivo. A seguir a madeira com adesivo é distribuída uniformemente sobre uma esteira contínua por meio de um sistema de esteiras e rolos denominado “formadora”, que dispõe a camada interna e as duas camadas externas sobre a esteira contínua, que por sua vez conduz a uma pré-prensa e finalmente à prensa aquecida. A energia térmica fornecida pela prensa às superfícies do material vaporiza a umidade, formando uma frente de vapor que conduz a energia para dentro do painel em formação, ocorrendo a cura da resina, consolidando definitivamente o painel (LESSMANN, 2008).

O processo de produção de painéis de partículas de madeira envolve as seguintes etapas: geração de partículas, secagem, classificação, aplicação de adesivo e de aditivos químicos, formação do colchão, pré-prensagem, prensagem a quente, resfriamento, acondicionamento, acabamento, classificação, embalagem e armazenamento (WEBER, 2011).

A primeira fase do processo consiste na geração das partículas, que pode acontecer interna ou externamente à unidade fabril e é feita através de equipamentos como: picadores e moinhos. Após a geração de partículas a próxima etapa é a secagem, onde se reduz a umidade do material até a porcentagem desejada. Após a secagem, o material é classificado em dimensões pré-determinadas e transportado até a encoladeira, onde se mistura resina, emulsão de parafina, catalisador e água se houver necessidade. Depois da aplicação de adesivo e de aditivos químicos o material segue para a estação formadora, onde é constituído o bolo ou colchão de partículas. Dependendo do processo, o colchão é compactado na pré-prensa e, posteriormente, segue à prensa quente. Após a prensagem, os painéis são transportados para um sistema de resfriamento antes da estocagem. Os painéis são, então, esquadrejados em dimensões comerciais e seguem para o acabamento, onde são lixados para remoção de imperfeições e nivelamento de superfície (WEBER, 2011).

2.3 Resina

A resina ureia-formol (RUF) é o adesivo mais utilizado na fabricação de painéis de partículas de madeira e de painéis MDF, sendo utilizada em mais de 90% dos painéis de madeira. O amplo emprego das resinas ureia-formol para a fabricação de painéis deve-se a:

- Seu baixo custo, devido ao baixo custo das suas matérias-primas ureia e formol;
- Ter como veículo a água, favorecendo o seu uso na indústria madeireira;
- Alta velocidade de cura, em comparação a outras resinas;
- Pouco desenvolvimento de cor, em relação a outras resinas;
- Resistência à chama, pela presença de nitrogênio.

De acordo com Belini (2007) o desenvolvimento das resinas sintéticas foi responsável pelo impulso na indústria de chapas e painéis de madeira, possibilitando, a partir de 1930, a confecção de chapas de qualidade superior.

De acordo com Pizzi (1994) citado por Belini (2007) a resina ureia-formol é a mais importante e a mais aplicada na indústria de chapas e painéis de partículas de madeira. São polímeros condensados produzidos pela reação entre formol e ureia, tendo com principais vantagens a solubilidade em água, dureza, boas propriedades térmicas e fácil adaptação às várias condições de cura.

Conforme Weber (2011) o efeito do tipo e da quantidade de resina sobre a composição dos painéis de partículas de madeira é bastante significativo. O aumento do teor de resina causa um incremento nas propriedades mecânicas do painel.

O método de aplicação e distribuição da resina é um importante fator que atua sobre a sua eficiência. Os principais tipos de resina utilizados pelas indústrias de painéis de partículas de madeira são a ureia-formaldeído (UF) e a fenol-formaldeído (FF).

Segundo Bufalino (2010) as faixas de viscosidade e o tempo de gelatinização ideais para a utilização do adesivo ureia-formol na produção de painéis de partículas de madeira são de 100 a 145 cP e 3 a 12 minutos, respectivamente. Para o ciclo de prensagem recomenda-se temperatura e pressão na faixa de 150 a 200°C e de 2 a 35 kgf/cm², respectivamente. O teor de umidade de partículas de produtos colados com ureia-formol é de 7 a 8% para a camada interna e 10 a 12% para as camadas externas do painel. Os teores de resina utilizados (sólidos) devem ser de 6 a 8% para o miolo do painel e 10 a 11% para as superfícies.

Quanto à quantidade de resina é importante enfatizar que esta é o componente da fabricação dos painéis que possui custo mais elevado em relação às outras matérias-primas utilizadas na fabricação dos painéis de partículas de madeira, devendo ser utilizada na menor quantidade possível, desde que não prejudique as propriedades físicas e mecânicas dos painéis. Dessa forma, de acordo com Bufalino (2010) o adesivo (resina) necessita ser aplicado somente nas porções das partículas que entrarão em contato com outras partículas, sendo que o adesivo (resina) em excesso aumenta o custo do painel e permanece entre as partículas sem função específica.

De acordo com Chamma (2004) resinas ureicas são indicadas para a produção de painéis para uso em ambientes internos, devido à baixa resistência à umidade. Outras características desse tipo de resina são o baixo custo, o fácil manuseio e o tempo mais rápido de cura em prensagem a quente. Resinas fenólicas são indicadas para uso em ambientes externos, mas têm a cura mais lenta e requerem temperatura de prensagem maior. Resinas melanina formaldeído tem desempenho semelhante ao das resinas fenol formaldeído, sendo, muitas vezes, misturadas para oferecer melhores resultados de resistência.

2.4 Parafina

A parafina é adicionada na mistura para a formação do colchão, a fim de proporcionar uma melhora na resistência do painel acabado quanto à absorção de água na forma líquida. Entretanto, isto não melhora o desempenho do painel quanto à absorção de vapor de água. Os efeitos da parafina na absorção de água na forma líquida e aumento na espessura do painel são significativos somente em curto intervalo de tempo, para testes de absorção e inchamento 12 horas, pois em períodos de tempos mais longos, para testes de absorção e inchamento 24 horas, o efeito não é significativo (MENDONÇA, 2008).

2.5 Estrutura do colchão e geometria das partículas

Segundo Bufalino (2010), as partículas podem ser distribuídas de maneiras distintas para a formação de três tipos diferentes de painel:

- Homogêneo: sem diferenciação entre as camadas;
- Multicamadas: com partículas menores nas camadas externas e maiores na camada interna;
- Graduado: o tamanho das partículas decresce gradualmente da camada interna até as camadas externas.

O painel mais utilizado pelas indústrias moveleiras é o confeccionado por multicamadas, com três camadas. Partículas grandes podem ser satisfatoriamente coladas utilizando-se uma pequena quantidade de resina, já que a área superficial é drasticamente reduzida à medida que o tamanho das partículas aumenta. No entanto, a utilização de partículas menores é mais satisfatória.

2.6 Prensa aquecida

De acordo com Bufalino (2010) a função da prensa aquecida na produção de painéis de partículas de madeira é consolidar o colchão até a espessura e densidade desejadas.

A operação de prensagem é uma etapa crítica, pois requer monitoramento da temperatura, da pressão e do tempo aplicados na produção de painéis de partículas de madeira. Segundo Surdi (2012) as condições de prensagem mais importantes que afetam as propriedades dos painéis de partículas de madeira são o teor de umidade do colchão de partículas, a velocidade de fechamento da prensa, o tempo e a temperatura de prensagem. As partículas com teor de umidade elevado requerem um tempo menor para atingir, sob pressão, uma desejada espessura.

O teor de umidade da matéria-prima é um dos mais importantes fatores na manufatura de painéis de partículas de madeira. Na indústria, as partículas de madeira são secas a um teor de umidade entre 3 e 6% dependendo do tipo e do teor de resina. Após a mistura das partículas secas com a resina, o teor de umidade eleva-se para uma faixa compreendida entre 8 e 14%, sendo que 12% representa o valor de teor de umidade ótimo para um colchão de partículas com distribuição uniforme (SURDI, 2012).

Outra variável importante é o tempo de fechamento da prensa que, segundo Surdi (2012), equivale ao tempo de compressão das partículas desde o contato dos pratos da prensa com o material, até atingir a espessura desejada. Um tempo muito longo de fechamento faz com que a resina nas partículas em contato com os pratos aquecidos da prensa polimerize

antes que um contato suficiente entre as partículas tenha ocorrido, resultando na redução da adesão do material e ocasionando a pré-cura nas camadas superficiais, o que reduz as propriedades de resistência dos painéis.

Durante a prensagem, os “pratos” ou a cinta metálica contínua da prensa estão aquecidos entre 200 e 240°C e transmitem energia térmica ao conjunto de partículas com adesivo. O vapor gerado no contato metal-madeira avança para o interior do painel, servindo como meio de transmissão de energia. A temperatura no interior do painel em formação alcança entre 100 e 120°C (SURDI, 2012).

Surdi (2012) menciona que quanto maior a temperatura de prensagem, maior será o fluxo de calor, permitindo melhor densificação das camadas mais internas dos painéis, resultando em uma maior resistência das ligações internas e menor resistência à flexão estática.

O tempo de prensagem é necessário para que a camada interna do colchão atinja a temperatura necessária para a cura do adesivo, pois o aquecimento não é uniforme ao longo da espessura do painel. Além disso, é necessário que o painel seja prensado por tempo suficiente até a umidade em excesso evaporar do colchão. A pressão é de importância inferior em relação à temperatura e tempo de prensagem do painel logo após o alcance da consolidação inicial do colchão (SURDI 2012).

A madeira possui acidez natural, devido a uma variedade de ácidos orgânicos hidrossolúveis. O contato da madeira com o adesivo reduz o pH e, além disso, podem ser adicionadas ao adesivo algumas substâncias que aceleram a redução do pH, comumente chamadas no meio industrial de “catalisadores”. Dessa forma, a resina presente no adesivo cura em uma faixa ácida de pH, de cerca de 4,5 a 4,82. A cura da resina ocorre enquanto as partículas de madeira estão comprimidas e em íntimo contato, consolidando o painel. Por meio da cura da resina os painéis adquirem consistência físico-mecânica (LESSMANN, 2008).

2.7 Resíduos industriais

A ABNT-NBR10004 (ABNT, 1987) define resíduos sólidos da seguinte forma:

Resíduos sólidos são os resíduos nos estados sólido e semissólido, que resultam de atividades da comunidade de origem: industrial, doméstica, hospitalar, comercial,

agrícola, de serviços de varrição. Ficam incluídos nesta definição os lodos provenientes de sistemas de tratamento de água, aqueles gerados em equipamentos e instalações de controle de poluição, bem como determinados líquidos cujas particularidades tornam inviável o seu lançamento na rede pública de esgotos ou corpos de água, ou exijam para isso soluções técnicas e economicamente inviáveis em face à melhor tecnologia disponível (ABNT, 1987).

De acordo com Weber (2011) os resíduos sólidos gerados pela cadeia produtiva madeireira são provenientes, em sua maioria, das operações de usinagem da madeira ou da fabricação e usinagem de seus derivados. Dessa forma, em diversas etapas do processamento da madeira, desde o abate da árvore até a operação de lixamento de qualquer peça de um móvel, são gerados resíduos em diferentes proporções e com diferentes características.

Os resíduos sólidos provocam poluição ambiental e potencializam a transmissão de doenças. O custo da construção de incineradores e de aterros sanitários muitas vezes os inviabilizam. Isso contribuiu muito para a procura de finalidades úteis para esses resíduos, como matéria-prima, diminuindo assim o volume a ser aterrado (RIBEIRO, 1998).

A reciclagem dos resíduos sólidos, além de reduzir custos no seu tratamento, gera materiais de múltipla utilização, como na confecção de paredes, forros, divisórias ou painéis (LEÃO, 1997).

Os resíduos industriais são gerados nos processos produtivos e nas instalações industriais. Geralmente, os resíduos sólidos industriais, que são corretamente destinados a aterros sanitários industriais, sofrem um processo classificatório prévio ao seu tratamento e disposição final (PUPO, 2012).

De maneira geral, esta classificação é feita considerando-se os resultados de análises físico-químicas sobre o extrato lixiviado obtido a partir da amostra bruta do resíduo. Contudo, nas situações em que o resíduo industrial chega ao aterro sem uma classificação exata, há atrasos ou erros no tratamento e disposição final do mesmo, gerando problemas ao aterro e à empresa responsável pelo resíduo (PUPO, 2012).

Os resíduos industriais possuem composição bastante diversificada e uma grande quantidade é considerada perigosa por serem tóxicos e poder causar poluição do ar, da água e do solo. Podem ser constituídos por escórias (impurezas resultantes da fundição do ferro), cinzas, lodos, óleos, plásticos, papel, borrachas, entre outros (PUPO, 2012).

O reaproveitamento e a reciclagem de resíduos industriais não é uma questão simples e estes requerem conhecimentos multidisciplinares, baseados em técnicas de engenharia, princípios de economia, das ciências sociais, e das técnicas de planejamento urbano e regional (LEÃO, 1997).

Sob o ponto de vista do processo produtivo leva-se em consideração que na indústria de painéis de partículas de madeira, há uma geração de resíduos e emissões poluentes. Os resíduos mais importantes são os resíduos sólidos de madeira, cujo correto gerenciamento evita a poluição do solo, rios e até mesmo da atmosfera, além de possibilitar retorno financeiro na medida em que podem ser reaproveitados (WEBER, 2011).

Há carência de uma boa política de gerenciamento de resíduos no Brasil, e uma das metas a serem estabelecidas devem ser a reciclagem, que necessita, por sua complexidade, de eficazes empresas recicladoras e também de apoio da comunidade, e para isso deve ser conscientizada. Além disso, as indústrias recicladoras necessitam de apoio governamental, nessa atividade importante e pioneira, com grandes vantagens econômicas e ambientais (CHAMMA, 2004).

2.8 Resíduos das indústrias de base vegetal

Definem-se como resíduo das indústrias de base florestal, as sobras que ocorrem no processamento mecânico, físico ou químico, e que não são incorporadas ao produto final. No caso da celulose, a casca, a lama de cal, o lodo biológico, o resíduo celulósico e a cinza de caldeira resultante da queima de biomassa, e que são produzidos ao longo do processo de produção, são genericamente classificados como resíduos. A geração de resíduos tem sido significativa no setor florestal. As fábricas de papel e celulose deparam-se com problemas de ordem ambiental, devido à grande quantidade de resíduos gerados, aproximadamente 48 t de resíduos para cada 100 t de celulose produzida. A opção por aterro sanitário para disposição final destes resíduos é inviável, em função dos altos custos para sua implantação e manutenção, além da exigência de cuidados especiais no manuseio, tendo em vista os riscos de contaminação ambiental (BELLOTE *et al.*, 1998).

São considerados resíduos florestais, aqueles gerados e deixados na floresta como resultado das atividades de extração da madeira, como por exemplo, toras curtas, galhos, madeira proveniente de trato cultural, entre outros. Calcula-se que cerca de 20% da massa da árvore é deixada no local de colheita, em que até recentemente, eram queimadas a céu aberto (PIERRE, 2010).

Por falta de uma destinação imediata, grandes quantidades desses resíduos são simplesmente empilhadas e encontram-se em diversos estágios de decomposição. Muitas

vezes, os resíduos são queimados a céu aberto, ou sofrem combustão espontânea com emissão de particulados finos para a atmosfera (PIERRE, 2010).

2.9 Propriedades mecânicas

As propriedades mecânicas definem o comportamento da madeira quando submetida a esforços de natureza mecânica permitindo compará-la com outras madeiras de propriedades conhecidas e, por comparação, indicar as provas adicionais necessárias para conhecer sua utilização (ELEOTÉRIO, 2000).

As características mecânicas do painel podem ser afetadas pela temperatura, por defeitos existentes nos corpos de prova, pela velocidade e duração da carga e pela mudança de umidade abaixo do ponto de saturação das fibras (MENDONÇA, 2008).

2.9.1 Resistência a flexão estática

Segundo a NBR14810-1 (2013) flexão estática é a resistência que um corpo-de-prova de uma chapa de partículas de madeira, apoiado em seus extremos, oferece quando sujeito a uma força aplicada em seu centro até sua ruptura.

2.9.1.1 Módulo de ruptura (MOR)

O módulo de ruptura é uma propriedade muito importante e que determina a aplicabilidade dos painéis de partículas de madeira para uso estrutural. Pode ser definido como o limite do material quando submetido ao esforço máximo até a ruptura. A razão da compactação influi positivamente no MOR apresentando uma alta correlação. A densidade da camada superficial do painel exerce forte influência sobre o MOR, devido a maior resistência à flexão oferecida pelas camadas superficiais, em função da sua maior densificação (MENDONÇA, 2008).

3 MATERIAL E MÉTODOS

O presente trabalho foi conduzido no Laboratório de Resíduos Sólidos e Compósitos (RESIDUALL) no Departamento de Recursos Naturais - Ciências Ambientais, da Faculdade de Ciências Agrônômicas (FCA) - Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho (UNESP), Campus de Botucatu-SP.

Os experimentos foram realizados durante os meses de fevereiro a junho de 2014. A norma utilizada para confeccionar os painéis e para a realização dos ensaios foi a ABNT NBR 14810-2013 para painéis de partículas de média densidade.

3.1 Matérias-primas utilizadas na fabricação de partículas de madeira

As matérias-primas utilizadas foram madeira de *Eucalyptus grandis*, resina ureia-formol, emulsão de parafina e resíduos químicos industriais e foram integralmente cedidas por uma empresa de painéis de partículas de madeira localizada na região de Botucatu/SP.

3.1.1 Madeira e resíduos químicos industriais

As partículas de madeira de *Eucalyptus grandis* empregadas na fabricação dos painéis apresentavam uma geometria mais grossa (Figura 2) na camada interna e uma geometria mais fina (Figura 3) na camada externa dos painéis.

Figura 2 - Madeira da camada interna



Fonte: A autora, 2014.

Figura 3 - Madeira da camada externa



Fonte: A autora, 2014.

Os resíduos químicos industriais (resíduo da resina catalisada) - Figura 4 - utilizados na fabricação dos painéis são provenientes da limpeza da linha de impregnação de papéis e foram empregados na forma de pó na camada interna dos painéis.

Figura 4 - Resíduo químico industrial



Fonte: A autora, 2014.

Para obter as partículas do resíduo na forma de pó utilizou-se um moinho granulador horizontal Seibt, modelo 6/230 (Figura 5), pertencente ao Laboratório RESIDUALL.

Figura 5 - Moinho granulador



Fonte: A autora, 2014.

Após a moagem os resíduos químicos industriais foram armazenados em sacos plásticos até o momento da prensagem.

3.2 Fabricação dos painéis

Os painéis de madeira aglomerada com resíduos químicos industriais foram confeccionados por multicamadas, em três camadas, sendo formados por uma camada interna e duas externas. As dimensões do painel foram definidas em 35 cm x 35 cm x 1 cm, comprimento, largura e espessura, respectivamente.

Todos os painéis foram formados inicialmente, em uma etapa denominada pré-prensagem, em uma forma de madeira maciça com um tamanho de 35 cm x 35 cm x 25 cm, comprimento, largura e altura, respectivamente.

A metodologia usada no desenvolvimento do trabalho obedeceu a seguinte sequência de operações:

- Pesagem de madeira seca (g) em diferentes proporções para uma camada interna e duas externas dos painéis;
- Pesagem de resina ureia-formol (g) em diferentes proporções para uma camada interna e duas externas dos painéis;
- Pesagem de emulsão de parafina (g) em diferentes proporções para uma camada interna e duas externas dos painéis;
- Pesagem de água (g) para as duas camadas externas dos painéis;

- Pesagem do resíduo químico industrial para uma camada interna dos painéis;
- Homogeneização da mistura para as duas camadas externas dos painéis;
- Verificação do teor de umidade da mistura;
- Homogeneização da mistura para uma camada interna dos painéis;
- Verificação do teor de umidade da mistura;
- Pesagem das misturas;
- Formação do colchão e pré-prensagem manual;
- Prensagem a quente do colchão;
- Resfriamento do painel;
- Pesagem e verificação das dimensões, espessura e densidade;
- Corte dos painéis nas dimensões definitivas;
- Mapeamento e corte dos painéis para ensaio mecânico;
- Ensaio mecânico: flexão estática (MOR).

As proporções entre os resíduos químicos industriais e partículas de madeira empregadas na fabricação dos painéis foram 0/100, 5/95 e 10/90, constituindo três tratamentos, conforme descritos na Tabela 1.

Tabela 1 - Composição dos três tratamentos

Tratamento	Madeira seca	Resina e Aditivos	Resíduo
1	85,3%	14,7%	0%
2	85,3%	14,7%	5%
3	85,3%	14,7%	10%

Fonte: A autora, 2014.

O tratamento um (T1) corresponde ao tratamento com 0% de resíduo, o tratamento dois (T2) com 5% de resíduo e o tratamento três (T3) com 10% de resíduo. A porcentagem de resíduo foi dosada de forma adicional em cada tratamento e calculada de acordo com o total de material (madeira seca mais resina e aditivo), utilizado para a formação da camada interna dos painéis. Para cada tratamento foram fabricados três painéis (três repetições), totalizando nove painéis.

Os painéis de cada tratamento foram produzidos em diferentes dias, para não haver contaminação dos materiais entre os tratamentos.

A quantidade de cada material (gramas) e sua respectiva porcentagem utilizada para a fabricação de um painel está descrito na Tabela 2.

Tabela 2 - Quantidade (gramas) e porcentagem de material na fabricação de um painel

Camada	Madeira seca	Resina	Emulsão de parafina	Água
Interna	597,15 (60,3%)	82,27 (8,3%)	4,43 (0,5%)	0,00 (0%)
Externa	248,27 (25,1%)	42,26 (4,3%)	3,69 (0,4%)	12,97 (1,3%)

Fonte: A autora, 2014.

3.2.1 Testes piloto

Foi necessário a realização de testes piloto para verificar qual o tempo de prensagem e pressão utilizados para a fusão completa dos materiais e consolidação do painel sem a degradação do mesmo.

3.2.1.1 Temperatura de prensagem

A temperatura de prensagem adotada foi de 200 °C, que mostrou ser suficiente para a fusão dos materiais sem causar a degradação dos mesmos.

3.2.1.2 Tempo de prensagem

Constatou-se que para ter uma fusão completa dos materiais o tempo ideal de prensagem é de cinco minutos. Acima de cinco minutos foi possível notar a degradação do painel, conforme Figura 6.

Figura 6 - Degradação do painel



Fonte: A autora, 2014.

3.2.1.3 Pressão de prensagem

A pressão almejada do manômetro (P_{man}) para a prensagem dos painéis foi de 79,69 kgf/cm² obtida com por meio da expressão:

$$P_{\text{prensagem}} = \frac{P_{\text{man}} \times A_{\text{pistão}}}{A_{\text{painel}}}, \quad (1)$$

em que:

$P_{\text{prensagem}}$ = Pressão da prensa: 25,5 kgf/cm² ou 25 bar;

P_{man} = Pressão do manômetro que deve ser atingida pela prensa: 79,69 kgf/cm²;

$A_{\text{pistão}}$ = Área do pistão da prensa: 392 cm²;

A_{painel} = Área a ser prensada: 35 x 35 x 1 cm (1225 cm³).

Após a prensagem de diferentes painéis utilizando-se uma pressão de 79,69 kgf/cm², verificou-se que esta não foi suficiente para atingir os espaçadores da prensa e delimitar os painéis em um cm de espessura. Foi necessário utilizar uma pressão de 130 kgf/cm² para a confecção do painel com os parâmetros de dimensão, espessura e densidade ideais.

3.2.2 Mistura das partículas

Para a mistura das matérias-primas utilizou-se um homogeneizador (Figura 7).

Figura 7 - Homogeneizador



Fonte: A autora, 2014.

Primeiramente realizou-se a mistura dos materiais para as duas camadas externas do painel e logo após para uma camada interna do painel (Figura 8), para que a camada interna não tivesse um contato muito prolongado com a umidade do ambiente, mantendo-se a umidade desejada em 13%. A resina foi adicionada à mistura utilizando-se um sistema de gotejamento.

Os painéis do mesmo tratamento foram confeccionados em três bateladas individualmente, que correspondiam às três repetições e, entre os diferentes tratamentos, foi realizada a limpeza do homogeneizador para que não ocorresse interferência de um tratamento no outro. Verificou-se o tempo de mistura dos componentes para não gerar a cura precoce da resina, constatando que o tempo ideal foi em torno de quatro minutos.

Figura 8 - Mistura antes da homogeneização



Fonte: A autora, 2014.

Após sair do homogeneizador a mistura das diferentes camadas foi pesada em uma balança digital com precisão de 0,01g (Figuras 9 e 10). Tendo a massa real da camada externa, o material foi dividido em duas partes iguais para a confecção das camadas superior e inferior dos painéis.

Figura 9 - Mistura após homogeneização



Fonte: A autora, 2014.

Figura 10 - Pesagem dos materiais



Fonte: A autora, 2014.

Retirou-se uma amostra de cada uma das misturas das diferentes camadas para verificação do teor de umidade.

Para verificação do teor de umidade da mistura da camada interna e externas do painel após a homogeneização, utilizou-se o medidor de umidade Denver Instrument IR-200, onde as amostras são aquecidas utilizando calor por infravermelho para libertar umidade. Uma balança de precisão eletrônica integrada pesa a amostra antes e depois do aquecimento e calcula a umidade do material (Figura 11).

Figura 11 - Medidor de umidade



Fonte: A autora, 2014.

3.2.3 Formação do colchão e termoformagem por compressão

A formação do painel consiste na termoformagem por compressão, sendo que inicialmente foi realizada a montagem do colchão (PUPO, 2012). Primeiramente distribui-se o material da camada externa, seguido da mistura da camada interna e novamente a mistura da camada externa, dentro da caixa formadora (sem fundo), confeccionada em madeira, com as dimensões já mencionadas, compatíveis com os pratos da prensa. A cada camada colocada no molde da caixa foi realizada uma pré-prensagem, feita por meio de pressão manual, exercendo uma força moderada, por meio da tampa da caixa de madeira, sobre o colchão para a conformação inicial do mesmo. Essa caixa foi apoiada sobre uma chapa de alumínio e, sobre ela, foi colocada uma folha de acetato, para impedir a aderência dos resíduos nos pratos, durante a prensagem (Figura 12).

Figura 12 - Colchão pré-moldado



Fonte: A autora, 2014.

Após a retirada da caixa e da tampa de madeira, outra folha de acetato foi colocada na face superior do colchão pré-moldado (Figura13), seguido pela colocação de outra chapa de alumínio, estando assim o colchão pronto para ser encaminhado à prensagem.

Figura 13 - Colchão pré-moldado



Fonte: A autora, 2014.

A prensagem foi feita em uma prensa hidráulica de laboratório OMECO (Figura 14), com fechamento simples, aquecimento elétrico, ajuste independente da temperatura dos dois pratos (dimensões: 60 x 60 cm) e controle analógico da pressão aplicada. Deve-se salientar que as variáveis do processo de operação foram: tempo de prensagem, pressão e temperatura. O ciclo de prensagem foi de 5 minutos, a uma temperatura de 200°C e com uma pressão de 130 kgf/cm².

Figura 14 - Prensa hidráulica



Fonte: A autora, 2014.

Na prensa, juntamente com o colchão pré-moldado, foram colocados dois espaçadores metálicos de um cm de espessura, com a função de limitar a espessura do painel no momento

final da prensagem (Figura 15). Ao término da prensagem, a abertura da prensa foi realizada automaticamente.

Figura 15 - Prensagem do colchão



Fonte: A autora, 2014.

Após ser retirado da prensa colocou-se uma chapa de ferro sobre o painel para que este não empenasse, até o seu resfriamento total (Figura 16). Este procedimento é realizado para evitar a volta do colchão às condições iniciais antes da prensagem.

Figura 16 - Resfriamento do painel



Fonte: A autora, 2014.

Após o resfriamento em temperatura ambiente, o painel foi pesado, medindo-se também a dimensão e espessura, obtendo-se os valores preliminares de densidade.

Após esta etapa, o painel foi preparado nas dimensões definitivas, para estudo mecânico da propriedade Módulo de Ruptura (Figura 17). Verificou-se novamente o peso final dos painéis, dimensão e espessura, obtendo-se os valores finais de densidade dos painéis.

Figura 17 - Painel pronto para ser mapeado



Fonte: A autora, 2014.

3.3 Ensaios mecânicos em corpos de provas dos painéis

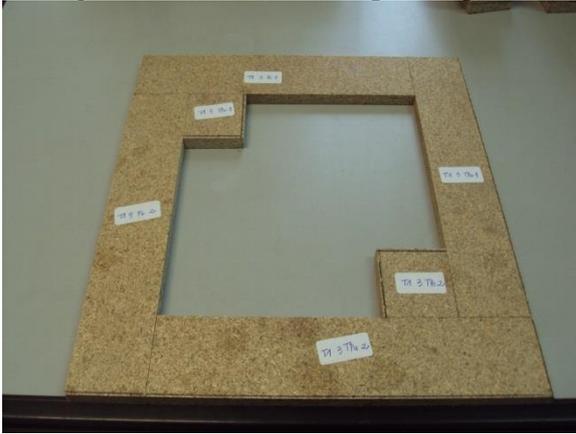
Para análise das propriedades mecânicas de Módulo de Ruptura (MOR) dos painéis confeccionados com diferentes proporções de madeira e sólidos granulares de resíduos químicos industriais, empregaram-se como referência a norma ABNT NBR 14810-1 (2014), utilizada para chapas de madeira aglomerada e que especifica as propriedades de desempenho requeridas para as chapas de aglomerado. Seu uso se justifica pela semelhança do produto desenvolvido nesta pesquisa com uma chapa de madeira aglomerada.

Os ensaios mecânicos de flexão estática foram realizados no Laboratório de Resíduos Sólidos e Compósitos (RESIDUALL), do Departamento de Recursos Naturais - Ciências Ambientais da Faculdade de Ciências Agrônômicas da UNESP, localizado no Campus de Botucatu-SP.

O desempenho mecânico dos painéis foi avaliado por meio da determinação da flexão estática, obtendo-se os valores de módulo de ruptura.

Para cada tratamento foram retirados dois corpos de prova por painel para os ensaios de flexão estática (F), totalizando 18 corpos de prova, indicados nas Figuras 18 e 19.

Figura 18 - Corte dos corpos de prova



Fonte: A autora, 2014.

Figura 19 - Corte dos corpos de prova



Fonte: A autora, 2014.

3.3.1 Flexão Estática

Os ensaios de flexão foram realizados de acordo com a norma ABNT NBR 14810-2013. Com base na referida norma, os corpos de prova foram confeccionados com 1,0 cm de espessura, 5,0 cm de largura e 25,0 cm de comprimento.

Os ensaios de flexão foram realizados em uma Máquina Universal de Ensaio Servo-hidráulica, marca EMIC, pertencente ao Laboratório de Resíduos Sólidos e Compósitos (RESIDUALL) da FCA/UNESP, Botucatu-SP (Figura 20).

Figura 20 - Máquina universal de ensaios



Fonte: A autora, 2014.

3.3.1.1 Determinação da resistência à flexão e módulo de elasticidade

A aparelhagem necessária à execução do ensaio foi a descrita a seguir:

- a) Máquina universal de ensaios com controle de velocidade;
- b) Medidor de espessura com resolução de 0,1 mm;
- c) Paquímetro.

3.3.1.2 Procedimento

Para a realização do ensaio colocou-se os extremos do corpo-de-prova sobre dois apoios da máquina universal de ensaios (Figura 21), sendo que o comprimento do vão foi de 200 mm, o comprimento mínimo exigido pela norma, de modo que o dispositivo para aplicar a carga coincidiu com o centro do corpo-de-prova. Previamente à colocação dos corpos-de-

prova, mediu-se as dimensões de suas seções transversais, com resolução de 0,1 mm. Os valores das seções dos corpos-de-prova foram obtidos com o uso da seguinte fórmula:

$$S = \frac{2 \times b \times h^2}{3 \times d^2}, \quad (2)$$

em que:

S é a área da seção;

b é a largura do corpo-de-prova em milímetros (mm);

h é a espessura do corpo-de-prova em milímetros (mm);

d é o comprimento do vão utilizado na máquina.

Figura 21 - Ensaio de flexão estática



Fonte: A autora, 2014.

Antes à execução do ensaio zerou-se o indicador de carga da máquina universal de ensaios e a acionou com velocidade constante de 6 mm/min, de acordo com a espessura do corpo-de-prova, que foi aproximadamente 10 mm ou 1 cm.

Anotou-se as dimensões dos corpos-de-prova e a carga no limite proporcional (P1) registrada no indicador de cargas da máquina universal de ensaios, bem como o valor da força de ruptura lido no indicador de cargas da máquina.

A partir do ensaio de flexão estática, foram obtidos os valores de MOR (módulo de ruptura), que são dados pela equação abaixo:

$$\text{MOR} = \frac{1,5 \times (P \times D)}{B \times (E)^2}, \quad (3)$$

sendo que:

MOR é o módulo de ruptura, em megapascals (Mpa);

P é a carga de ruptura lida no indicador de cargas, em newtons (N);

D é a distância entre apoios do aparelho, em milímetros (mm);

B é a largura do corpo-de-prova, em milímetros (mm);

E é a espessura média tomada em três pontos do corpo-de-prova, em milímetros (mm).

Os resultados foram expressos em megapascals (MPa) com exatidão de 0,1 Mpa para MOR.

3.4 Delineamento estatístico e análises

Os dados levantados foram analisados por meio de técnicas da estatística descritiva para melhor entendimento da distribuição das variáveis analisadas e para comparação entre os tratamentos com 0%, 5% e 10% resíduo. Nas diferentes variáveis foi utilizada a técnica de análise de variância paramétrica complementada com o teste de Tukey com nível de 5% de significância.

Para o processamento das análises estatísticas foram utilizados o pacote *Office Microsoft Excel* e o *software SigmaStat* versão 3.5.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Caracterização dos painéis de partículas de madeira

A massa total dos painéis, da camada interna (CI) e da camada externa (CE) antes da prensagem dos painéis encontra-se na Tabela 3.

Tabela 3 - Massa dos painéis antes da prensagem

Tratamento	Painel	Massa pré-prensagem (g)		Total (g)
		CI	CE	
T1	1	679,90	300,60	980,50
	2	679,60	308,10	987,70
	3	677,90	306,80	984,70
Média (desvio padrão)				984,30 (3,62)
T2	1	714,80	304,70	1019,50
	2	708,50	301,90	1010,40
	3	708,70	302,70	1011,40
Média (desvio padrão)				1013,77 (4,99)
T3	1	743,90	304,80	1048,70
	2	740,30	305,10	1045,40
	3	741,10	304,50	1045,60
Média (desvio padrão)				1046,57 (1,85)

Fonte: A autora, 2014.

Os resultados apresentados na Tabela 3 demonstraram que, em geral, os valores de massa dos painéis produzidos sem adição de resíduo (T1) são inferiores a aqueles produzidos com adição do resíduo (T2 e T3), devido a não inserção de material.

A umidade almejada para a camada interna do painel é de 8% e para as camadas externas é de 13%, para induzir a cura da resina primeiro na camada interna do painel e posteriormente nas camadas externas do painel.

Os valores de umidade da camada interna (CI) e da camada externa (CE) dos painéis estão descritos na Tabela 4.

Tabela 4 - Teores de umidade das camadas interna e externas antes da prensagem

Tratamento	Painel	Umidade (%)	
		CI	CE
T1	1	8,92	12,19
	2	9,31	12,24
	3	9,54	18,53
Média (desvio padrão)		9,26 (0,31)	14,32 (3,65)
T2	1	10,57	13,81
	2	13,35	18,25
	3	16,89	22,06
Média (desvio padrão)		13,60 (3,17)	18,04 (4,13)
T3	1	12,73	15,92
	2	10,86	18,75
	3	16,78	12,66
Média (desvio padrão)		13,46 (3,03)	15,78 (3,05)

Fonte: A autora, 2014.

Os resultados apresentados na Tabela 4 mostraram que, em geral, assim como verificado no valor da massa dos painéis encontrado antes da prensagem, os valores do teor de umidade das camadas interna e externas são superiores nos painéis em que há adição do resíduo químico.

Verificou-se o peso final dos painéis, dimensão e espessura, obtendo-se os valores finais de densidade básica dos painéis, descritos na Tabela 5.

Tabela 5 - Massa final, espessura, volume e densidade final dos painéis, segundo tratamento

Tratamento	Painel	Massa final (g)	Espessura (cm)	Volume (cm³)	Densidade (g/cm³)
T1	1	849,80	0,98	1200,50	0,71
	2	856,40	1,03	1261,75	0,68
	3	860,80	1,05	1289,31	0,67
Média		855,67	1,02	1250,52	0,68
T2	1	886,30	0,96	1179,06	0,75
	2	882,60	1,08	1316,88	0,67
	3	878,70	1,03	1264,81	0,69
Média		882,53	1,02	1253,58	0,71
T3	1	882,80	1,04	1274,00	0,69
	2	900,60	1,10	1347,50	0,67
	3	897,50	1,06	1301,56	0,69
Média		893,63	1,07	1307,69	0,68

Fonte: A autora, 2014.

Segundo a norma ABNT NBR 14810-2013 a densidade básica dos painéis deve variar entre 0,55 g/cm³ e 0,75 g/cm³ para que se enquadrem como painéis de média densidade. Pela Tabela 5 verificou-se que os valores de densidade básica dos painéis variaram entre o valor mínimo de 0,67 g/cm³ e o valor máximo de 0,75 g/cm³ sendo classificados como painéis de média densidade.

Os resultados apresentados na Tabela 5 demonstraram também que a espessura média dos painéis produzidos sem adição de resíduo (T1) e com 5% de adição (T2) estão mais próximas ao valor nominal de 1 cm, sendo 1,02 cm. Quanto aos painéis com 10% de adição de resíduo, a média da espessura encontrada foi de 1,07 cm.

As densidades básicas médias e seus respectivos desvios padrão estão apresentados na Tabela 6.

Tabela 6 - Média e desvio padrão da densidade básica, segundo tratamento

Tratamento	Média (g/cm³)	Desvio padrão (g/cm³)
T1	0,685 a ¹	0,0208
T2	0,706 a	0,0418
T3	0,684 a	0,0133

¹ Duas médias seguidas de mesma letra mostram que não houve diferença estatística significativa entre os tratamentos ao nível de 5% de significância (valor p=0,587)

Pelo teste de Tukey não foi possível mostrar diferença estatística entre as densidades básicas médias dos painéis. A maior densidade básica ocorreu no T2 (painel fabricado com

5% de resíduo), enquanto que para os outros dois tratamentos (0% e 10% de resíduo) os valores das densidades básicas médias são muito próximos.

Na Tabela 7 encontram-se os valores médios para o módulo de ruptura (MOR) dos painéis. Pelo teste de Tukey, ao nível de 5% de significância, não foi possível mostrar diferença estatística entre os valores médios do MOR dos painéis.

Tabela 7 - Valores médios do MOR, segundo tratamento

Tratamento	MOR (MPa)
1	16,761 (3,534) a ²
2	22,068 (7,079) a
3	16,249 (2,152) a

² Duas médias seguidas de mesma letra mostram que não houve diferença estatística significativa entre os tratamentos ao nível de 5% de significância

Os resultados apresentados na Tabela 7 demonstraram que as médias dos valores do MOR dos painéis produzidos sem adição de resíduo (T1) e com 10% de adição (T3) são similares e inferiores aos painéis do T2 (5% de adição).

Sabendo que as propriedades mecânicas dos painéis como o MOR são em grande parte explicadas pela densidade e verificando que a maior média de densidade foi encontrada no T2, observou-se um aumento do valor de MOR neste tratamento quando comparado com os demais. Isso ocorreu devido a menor espessura do corpo de prova um do T2 (0,96 cm) para uma massa de 886,3 g.

5 CONCLUSÃO

Neste trabalho avaliou-se a propriedade mecânica MOR tendo como conclusão principal que os painéis em estudo tiveram bom desempenho, atendendo, no geral, as especificações técnicas estabelecidas pela norma técnica adotada.

Não houve efeito significativo na propriedade mecânica em estudo nos painéis com diferentes percentuais de resíduos químicos industriais adicionados.

Na continuidade desta linha de pesquisa, sugere-se a avaliação de mais propriedades mecânicas e físicas de painéis de partículas de madeira com maiores proporções de resíduos químicos industriais.

REFERÊNCIAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10004**: resíduos sólidos: classificação. Rio de Janeiro, 1987. 71p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14810-2013**: painéis de partículas de média densidade: terminologia. Botucatu, 2014. 60 p.
- BAHIANA, C. **A importância do design para sua empresa**. Brasília: CNI. 1998.56 p.
- BANCO NACIONAL DE DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO E SOCIAL. **Painéis de madeira reconstituída**. Disponível em: <<http://www.bndes.gov.br/conhecimento/relato/relato02.pdf>>. Acesso em: 07 out. 2013 às 16h12min.
- BELINI, U. L. **Caracterização e alterações na estrutura anatômica da madeira do *Eucalyptus grandis* em três condições de desfibramento e efeito nas propriedades tecnológicas de painéis MDF**. 2007. 90 f. Dissertação (Mestrado em Recursos Florestais) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2007.
- BELLOTE, A. F. J. et al. Resíduos da indústria de celulose em plantios florestais. **Boletim de Pesquisa Florestal**, Colombo, n. 37, p. 99-106, jul./dez. 1998.
- BUFALINO, L. **Avaliação da permeabilidade e sua influência sobre propriedades físicas e de colagem em painéis aglomerados**. 2010. 90 f. Dissertação (Mestrado em Ciências e Tecnologia da Madeira), Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2010.
- CHAGAS, F. B.; GONÇALVES, R. M.; MATTOS, R. L. G. **Painéis de madeira no Brasil: panorama e perspectivas**, BNDES Setorial, Rio de Janeiro, n. 27, p. 121-156, mar. 2008. Disponível em: <http://www.bibliotecaflorestal.ufv.br/bitstream/handle/123456789/4136/BNDES_Pain%20de%20madeira-no-Brasil-panorama-e-perspectivas.pdf?sequence=1>. Acesso em: 07 out. 2013 às 16h24min.
- CHAMMA, P. V. C. **Produção de painéis a partir de resíduos sólidos para uso como elemento arquitetônico**. 2004. 138 f. Tese (Doutorado em Agronomia) – Faculdade de Ciências Agrônomicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2004. Disponível em: <http://observatorioderesiduos.com.br/wp-content/uploads/2011/03/chamma_pvc_dr_botfca.pdf>. Acesso em: 14 out. 2013 às 8h42min.
- ELEOTÉRIO, J. R. **Propriedades físicas e mecânicas de painéis MDF de diferentes densidades e teores de resina**. 2000. 122 f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia de Madeiras) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2000.
- LARA PALMA, H. A. **Painéis de madeira**. Botucatu: UNESP, Faculdade de Ciências Agrônomicas. 2009. 40 f.
- LEÃO, A. L. **Viabilidade técnica da produção de compósitos não-estruturais à base de lignocelulósicos**. 1997. 144 f. Tese (Livre-docência)-Faculdade de Ciências Agrônomicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 1997.

- LESSMANN, V. E. **Estudo da reação de cura de resina ureia-formol por espectrometria de ressonância magnética nuclear.** 2008. 121 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Exatas), Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2008.
- MENDONÇA, L. L. **Produção de painéis de madeira com clones de *Eucalyptus urophylla*: estudo de caso para uso na indústria de móveis e construção civil.** 2008. 129 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais), Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2008.
- PIERRE, F. C. **Caracterização físico-mecânica de painéis aglomerados de *Eucalyptus grandis* com adição de resíduos industriais madeireiros.** 2010. 134 f. Tese (Doutorado em Ciência Florestal) – Faculdade de Ciências Agrônomicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2010.
- PUPO, H. F. F. **Painéis alternativos produzidos a partir de resíduos termoplásticos e da pupunheira (*Bactris gasipaes* Kunth).** 2012. 94 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia/Energia na Agricultura) – Faculdade de Ciências Agrônomicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2012.
- RIBEIRO, T. R. A. **Estudo da utilização de embalagens multifoliadas para produção de painéis.** 1998. 94 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia/Energia na Agricultura)-Faculdade de Ciências Agrônomicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 1998.
- SÁ, V. A. **Potencial da madeira de cedro australiano (*Toona ciliata* M. Roem var. *australis*) na manufatura de produtos de maior valor agregado.** 2009. 92 f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia da Madeira) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2009.
- SURDI, P. G. **Produção de painéis de partículas orientadas (OSB) a partir da madeira de um híbrido de *Pinus elliottii* var. *elliottii* x *Pinus caribaea* var. *hondurensis*.** 2012. 102 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2012.
- WEBER, C. **Estudo sobre viabilidade de uso de resíduos de compensados, MDF e MDP para a produção de painéis aglomerados.** 2011. 90 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal/Ciências Agrárias) – Faculdade de Ciências Florestais, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2011.

Botucatu, 09 de Junho de 2014.

Gabriela Vicente de Oliveira
Orientado (a)

De Acordo:

Prof.^a Dr.^a Fernanda Cristina Pierre
Orientador (a)

Prof. Dr. Osmar Delmanto Júnior
Coordenador do Curso de Agronegócio