UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
FACULDADE DE ZOOTECNIA E ENGENHARIA DE ALIMENTOS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA E CIÊNCIA DE MATERIAIS

THALES FAVORETTO POZZER

**Painel sanduíche com núcleo corrugado de partículas de bagaço de
cana-de-açúcar e resina PU-mamona**

Pirassununga

2019

THALES FAVORETTO POZZER

**Painel sanduíche com núcleo corrugado de partículas de bagaço de
cana-de-açúcar e resina PU-mamona**

Versão corrigida

Dissertação apresentada à Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para a obtenção do Título de Mestre em Engenharia e Ciência de Materiais.

Área de concentração: Desenvolvimento, caracterização e aplicação de materiais voltados à Agroindústria.

Orientador: Prof. Dr. Juliano Fiorelli

Pirassununga

2019

Ficha catalográfica elaborada pelo Serviço de
Biblioteca e Informação, FZEA/USP, com os
dados fornecidos pelo(a) autor(a)

Ficha catalográfica elaborada pelo
Serviço de Biblioteca e Informação, FZEA/USP,
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

P365p Pozzer, Thales
Painel sanduiche com núcleo corrugado de
partículas de bagaço de cana-de-açúcar e resina PU-
mamona / Thales Pozzer ; orientador Juliano
Fiorelli. -- Pirassununga, 2019.
71 f.

Dissertação (Mestrado - Programa de Pós-Graduação
em Engenharia e Ciência de Materiais) -- Faculdade
de Zootecnia e Engenharia de Alimentos,
Universidade de São Paulo.

1. Bagaço de cana-de-açúcar. 2. Painéis de
partículas. 3. Painéis sanduiche com núcleo
corrugado. 4. Matriz orgânica. 5. Materiais
compósitos. I. Fiorelli, Juliano, orient. II. Título.

THALES FAVORETTO POZZER

**Painel sanduíche com núcleo corrugado de partículas de bagaço de
cana-de-açúcar e resina PU-mamona**

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Juliano Fiorelli
Instituição Universidade de São Paulo - USP

Prof.^a Dr.^a Cristiane Inácio de Campos
Instituição Universidade Estadual de São Paulo

Prof.^a Dr.^a Juliana Cortez Barbosa

Prof.^a Dr.^a Eliria Maria de Jesus Agnolon Pallone

Pirassununga, ____ de _____ de 20____.

DEDICATÓRIA

Aos meus pais Maria Amíris e Carlos Eduardo por todos os conselhos e empenho na minha criação e todo apoio à minha trajetória até aqui. Pela inspiração que me fez seguir adiante na busca de minha autonomia e sucesso na carreira profissional.

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. Juliano Fiorelli pela oportunidade e por ter me despertado o interesse nessa linha de pesquisa. Agradeço pela orientação, paciência e pela confiança.

Ao Prof. Holmer Savastano pelo incentivo e interesse no tema dessa pesquisa e contribuições na orientação.

Ao Prof. Dr. Khosrow Ghavami pela inspiração e por acreditar no meu potencial, sendo um grande incentivo para eu iniciar os estudos na Pós-Graduação.

À Prof.^a Dr.^a Cristiane que participou da qualificação e contribuiu com importantes orientações para o prosseguimento da pesquisa.

Ao Donizeti Curcio Luciano da empresa IMPERVEG Poliuretano Vegetal, pela doação da resina PU-mamona que foi utilizada na produção dos painéis de partículas.

Aos técnicos do Constrambi (Laboratório de Construção e Ambiente), Diego pelo auxílio no desenvolvimento da metodologia de produção dos painéis trapezoidais, Mariana pelo auxílio na preparação das partículas e produção dos painéis e Zaqueu pelo apoio, atenção e colaboração na caracterização do material desenvolvido nesta pesquisa.

Aos amigos de laboratório, principalmente Christian pela parceria, amparo e interesse em ajudar no desenvolvimento da pesquisa e a Carolina pela amizade e apoio nos momentos difíceis.

Ao colega Guilherme pelo incentivo e importante contribuição no conteúdo do trabalho.

À Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos, pela oportunidade concedida de realização do curso de mestrado.

À Deus pela vida e oportunidade.

“O conhecimento nos faz responsáveis.”

Ernesto Guevara

RESUMO

POZZER, T.F. **Painel sanduíche com núcleo corrugado de partículas de bagaço de cana-de-açúcar e resina PU-mamona**. 2018. 74 f. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos, Universidade de São Paulo, Pirassununga, 2018.

Atualmente existe uma nova tendência na área da construção civil que visa a utilização de materiais com baixo impacto ambiental e sistemas construtivos que utilizem estruturas leves. Neste contexto, os painéis sanduíche vêm conquistando espaço por ser um material que permite conciliar alta resistência mecânica, isolamento térmico e baixo peso. O presente trabalho teve como objetivo estudar o desempenho físico e mecânico de painéis de partículas no formato sanduíche, constituídos de duas faces planas e núcleo corrugado, ambos de partículas bagaço de cana-de-açúcar e resina poliuretana bicomponente à base de óleo de mamona (PU mamona). O material produzido foi caracterizado por meio da determinação das propriedades densidade aparente, inchamento em espessura, módulo e rigidez de cisalhamento, rigidez à flexão e adesão interna das partículas, seguindo as recomendações estabelecidas pelas normas ASTM D1037:2006 (propriedades físico-mecânicas dos painéis planos); ASTM C393 M:2016 e D7250 M:2016 (propriedades mecânicas de flexão do painel sanduíche). Os resultados obtidos de propriedades mecânicas de flexão foram comparados com valores de diferentes classes de painéis OSB contidos no documento PS-2-10 (APA The Engineered Wood Association, 2011), essa comparação permitiu classificar o material com possibilidade de uso comocomponente construtivo com função estrutural, inclusive para aplicações como laje-piso, sendo que o painel avaliado suportou as cargas típicas residenciais e atendeu aos requisitos de deflexão admissível estabelecidos pelo International Building Code (IBC, 2012). Com relação à densidade, os painéis sanduíche avaliados se enquadram na categoria de painéis de baixa densidade. As propriedades de inchamento em espessura e adesão interna dos tratamentos T1 e T2 atenderam às exigências dos requisitos normativos.

Palavras-chave: Painel de partículas; resíduo agroindustrial; compósitos lignocelulósicos; núcleo trapezoidal

ABSTRACT

POZZER, T.F. **Sandwich panel with corrugated core of sugarcane bagasse and PU-castor resin**. 2018. 74 f. M.Sc. Dissertation – Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos, Universidade de São Paulo, Pirassununga, 2018.

Currently there is a new trend in the area of civil construction that aims to use materials with low environmental impact and construction systems that use lightweight structures. In this context, the sandwich panels have been gaining space because it is a material that allows to reconcile high mechanical resistance, thermal insulation and low weight. The present work had the objective of studying the physical and mechanical performance of sandwich panels, consisting of two flat faces and corrugated core, both of sugarcane bagasse particles and castor oil based bicomponent polyurethane resin (PU castor). The material produced was characterized by determining the properties of bulk density, thickness swelling, shear modulus and stiffness, flexural stiffness and internal adhesion of the particles, following the recommendations established by ASTM D1037: 2006 (physical-mechanical properties of panels plans); ASTM C393 M: 2016 and D7250 M: 2016 (mechanical properties of sandwich panel flexure). The obtained results of mechanical properties of flexion were compared with values of different classes of OSB panels contained in document PS-2-10 (APA The Engineered Wood Association, 2011), this comparison allowed to classify the material with possibility of use with constructive component with function structural, including for slab-floor applications, and the panel evaluated supported typical residential loads and met the International Building Code (IBC, 2012) deflection requirements. With regard to density, the sandwich panels evaluated fall into the category of low density panels. The swelling properties in thickness and internal adhesion of the treatments T1 and T2 met the requirements of the normative requirements.

Keywords: Particleboard; agroindustrial waste; lignocellulosic composites; trapezoidal core

LISTA DE FIGURAS

Figura 1– Total de artigos publicados contendo o termo “particleboard”, bases de dados SCOPUS e WEB OF SCIENCE e aumento de publicações ao longo das décadas.....	25
Figura 2 - Total de artigos publicados contendo os termos “particleboard” e “bagasse”, bases de dados SCOPUS e WEB OF SCIENCE e aumento de publicações ao longo das décadas.....	26
Figura 3 – Total de artigos publicados contendo os termos “particleboard” e “corrugated core”, bases de dados SCOPUS e WEB OF SCIENCE e aumento de publicações ao longo das décadas.	27
Figura 4 - Estrutura típica de um compósito sanduíche	35
Figura 5 – Exemplo de construção utilizando painéis SIPs.....	36
Figura 6 - Similaridade entre a configuração da seção transversal de: (a) estruturas sanduíche; (b) vigas “I”.	Erro! Indicador não definido.
Figura 7 - Diferentes tipos de núcleo: (a) polimérico; (b) colmeia; (c) corrugado.....	37
Figura 8 – Considerações importantes para o projeto da geometria do núcleo e variáveis usadas para descrever a geometria, para tensão de cisalhamento.	38
Figura 9 - Painel OSB com núcleo corrugado em ensaio de flexão	39
Figura 10 – Painéis OSB com núcleo moldado e os respectivos pontos de falha na flexão.	39
Figura 11 – Etapas de produção do painel plano. a) Material pronto para ser misturado com o adesivo. b) Moldagem do colchão de partículas. c) Colchão de partículas introduzido na prensa termo-hidráulica. d) Painel após a prensagem.	47
Figura 12 - Molde utilizado para a produção dos painéis trapezoidais. a) Parte inferior da forma. b) Colchão de partículas sobre o molde trapezoidal. c) Colchão de partículas a ser prensado.	47
Figura 13 – Falhas ocorridas nas primeiras tentativas de moldagem dos painéis trapezoidais. a) Painel ainda no molde com rachaduras nas faces superiores dos trapézios b) Detalhe do tipo de falha. c) Painéis retirados do molde apresentando falhas.	48
Figura 14 – Moldagem dos painéis trapezoidais com ajustes no processo. a) Caibros de madeira cortados no formato trapezoidal. b) Posicionamento dos trapézios de madeira no molde formador. c) Pré-prensagem d) Resultado da pré-prensagem.	49
Figura 15 – Colagem de dois conjuntos na “prensa” com ajuste de pressão manual.	50

Figura 16 – Imagens escaneadas dos corpos de prova para o cálculo da área, volume e massa.....	52
Figura 17 – Bloco de tração e amostra colada.	53
Figura 18 – Momento do ensaio após o rompimento por tração perpendicular	54
Figura 19 – Imagens demonstrativas de como foram determinadas as dimensões dos corpos de prova para o ensaio de flexão.	55
Figura 20 – Imagens do ensaio de flexão (longitudinal). a) Geometria do corpo de prova (ajustado para abranger uma célula inteira do núcleo). b) CP posicionado na máquina. c) CP após a falha.	55
Figura 21 – Imagens do ensaio de flexão (transversal). a) Geometria dos corpos de prova. b) CP posicionado na máquina. c) CP após a falha.	55
Figura 22 - Gráfico que apresenta os valores de IE e as recomendações normativas	62
Figura 23 – Variação da força pela deformação - T1	65
Figura 24 – Variação da forma pela deformação - T2	65
Figura 25 – Variação da força pela deformação - T3	66
Figura 26 – Detalhes dos tipos de falha: a) Amostra longitudinal após o descolamento da fase inferior. b) Amostra transversal após ensaio, com sinais de descolamento da fase inferior e cisalhamento no núcleo. c) Detalhe da falha por cisalhamento do núcleo em uma amostra transversal.	66

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Resultados de propriedades físico-mecânicas de painéis de partículas feitos com bagaço de cana-de-açúcar e requisitos normativos recomendados para painéis de madeira.	32
Tabela 2 - Propriedades físico-mecânicas de painéis particulados feitos com bagaço de cana e diferentes tipos de resina	34
Tabela 3 – Parâmetros de produção	45
Tabela 4 – Plano experimental	45
Tabela 5 – Densidade aparente dos painéis planos.....	59
Tabela 6 – Densidade nominal do painel-sanduiche	60
Tabela 7 – Valores de IE das faces	61
Tabela 8 – Valores de AI das faces	63
Tabela 9 – Propriedades mecânicas dos painéis sanduiches de faces planas e núcleos trapezoidais.	64
Tabela 10 – Propriedades do painel sanduíche comparadas com propriedades de OSB estruturais.....	67
Tabela 11 – Resultados da simulação teórica de aplicação dos painéis como piso.....	68

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	21
1.1.	Objetivo geral	23
1.2.	Objetivos específicos:	23
2	REVISÃO DE LITERATURA	24
2.2	Bagaço de cana-de-açúcar	27
2.3	Painéis de partículas de madeira	28
2.4	Painéis de partículas de bagaço de cana-de-açúcar	30
2.5	Adesivos orgânicos para produção de painéis de partículas	33
2.6	Painéis sanduíche.....	35
2.6.1	<i>Painéis sanduíche com núcleo corrugado</i>	37
2.7	Parâmetros de produção de painéis de partículas.....	40
2.7.1	<i>Geometria das partículas</i>	40
2.7.2	<i>Umidade das partículas</i>	41
2.7.3	<i>Densidade e razão de compactação</i>	41
2.7.4	<i>Adesivo</i>	42
2.7.5	<i>Processo de prensagem: Temperatura, tempo e pressão</i>	42
2.8	Conclusão da revisão bibliográfica	43
3	MATERIAIS E MÉTODOS	44
3.1	Materiais	44
3.2	Métodos	45
3.3	Produção dos painéis de partículas.....	46
3.3.1	<i>Painéis planos multicamadas</i>	46
3.3.2	<i>Produção do núcleo corrugado</i>	47
3.3.3	<i>Colagem das faces planas ao núcleo corrugado</i>	49
3.4	Caracterização dos painéis de partículas	50
3.4.1	<i>Densidade aparente dos painéis planos e densidade nominal do conjunto</i>	50
3.4.2	<i>Inchamento em espessura</i>	52
3.4.3	<i>Adesão interna</i>	53
3.4.4	<i>Ensaio de flexão (ASTM C 393 M-16)</i>	54

3.5	Avaliação teórica do potencial de aplicação do material como componente construtivo	57
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	59
4.1	Densidade	59
4.2.1	<i>Densidade aparente dos painéis planos</i>	59
4.2.2	<i>Densidade nominal do conjunto</i>	60
4.2	Inchamento em espessura	61
4.3	Adesão interna	62
4.4	Ensaio de flexão	64
4.5	Avaliação teórica do potencial de aplicação do material como componente construtivo	68
5	CONCLUSÃO	70
6	REFERÊNCIAS	72

1 INTRODUÇÃO

Atualmente, devido à crescente exploração dos recursos naturais, principalmente oriunda do setor da construção civil, que é causador de grandes impactos ambientais e contribui para a ocorrência de mudanças climáticas, há uma tendência mundial de pesquisas na área de engenharia e ciência de materiais para a criação e viabilização de materiais construtivos não poluentes que utilizem matéria-prima renovável e demandem menos energia no processo de fabricação.

Neste contexto, estão sendo estudadas novas alternativas de matéria-prima, visando diminuir o impacto ambiental proveniente da extração de recursos naturais não renováveis destinados à fabricação de materiais de construção. Por outro lado, há também a necessidade do setor da construção civil de adaptar a novos sistemas construtivos que utilizem estruturas leves, eficientes e de baixo custo, se enquadrando assim no conceito da sustentabilidade, que abrange três fatores principais: ambiental, econômico e social. Portanto, para que um modelo de construção seja considerado sustentável, além de ser ambientalmente correto, deve atender aos interesses sociais e industriais.

A utilização do bagaço de cana-de-açúcar e outros subprodutos agroindustriais como matéria-prima para produção de materiais compósitos não convencionais vêm despertando interesse no meio acadêmico e industrial. Neste cenário, é importante que ocorra a aproximação entre o setor industrial e acadêmico, que desenvolve pesquisas para viabilizar o uso de novos materiais de construção com menor impacto ambiental e oriundos de recursos naturais renováveis.

O Brasil tem como base da economia o setor agrícola, subprodutos agroindustriais estão disponíveis em grandes quantidades, podendo ser utilizados para a fabricação de biocombustível, como fertilizante agrícola, na geração de energia e na fabricação de painéis reconstituídos.

O bagaço de cana-de-açúcar é um subproduto agroindustrial disponível em grandes quantidades em várias regiões do país, tendo em vista que a cana-de-açúcar é a principal cultura agrícola brasileira. Porém, este material não costuma ser desperdiçado pelas indústrias, sendo na maior parte das vezes queimado e aproveitado para a cogeração de energia. No entanto, aplicações mais nobres para este subproduto vêm sendo estudadas, como por exemplo, a utilização do bagaço para fabricação de painéis de partículas aglomerados com matriz orgânica ou inorgânica.

Os painéis aglomerados tiveram origem na Alemanha, na década de 1940, como alternativa à falta de madeiras de qualidade para fabricação de painéis compensados. Durante a Segunda Guerra Mundial, a Alemanha parou com essa atividade devido à escassez de recursos como o petróleo que inviabilizava a produção de resinas. A produção industrial de painéis de madeira reconstituída foi retomada e aprimorada nos EUA após a guerra, nas décadas de 1960 e 1970, quando além dos MDP (*medium density particleboard*) e MDF (*medium density fiberboard*) começaram a ser introduzidos no mercado os painéis “*waferboard*” e “*oriented strand board*” (OSB). No Brasil, a produção de painéis de partículas teve início na década de 1960, no entanto, a proposta de utilização da biomassa florestal residual ou de subprodutos agroindustriais na produção de painéis, até os dias de hoje não foi adotada em escala industrial, mas tem sido estudada em diversos trabalhos acadêmicos em escala laboratorial (IWAKIRI, 2005; MENDES et al., 2003).

A utilização de subprodutos agroindustriais lignocelulósicos é uma alternativa para produzir painéis de partículas. Atualmente, existem países como a Índia e a China que comercializam com sucesso painéis de partículas de bagaço de cana-de-açúcar, que possuem ampla aplicação no setor moveleiro.

Nos últimos anos, diversas pesquisas acadêmicas têm proposto a utilização de subprodutos agroindústrias lignocelulósicos para produção de painéis de partículas e demonstram a viabilidade da substituição de partículas de madeira por partículas de outros materiais lignocelulósicos. No entanto, essas pesquisas em geral abordam os painéis formato plano.

Dentro desse escopo, o presente trabalho apresenta a seguinte hipótese: “painéis sanduiche com faces planas e núcleo corrugado (trapezoidal) de partículas de bagaço de cana-de-açúcar aglomeradas com resina poliuretana à base de óleo de mamona (PU-mamona) possuem potencial para serem aplicados como componente construtivo”.

1.1. Objetivo geral

Estudar a viabilidade técnica de produção de painéis no formato sanduíche com faces planas e núcleo corrugado (trapezoidal) com partículas de bagaço de cana-de-açúcar aglomeradas com resina poliuretana bicomponente à base de óleo de mamona (PU-mamona) e avaliar seu desempenho físico e mecânico com viés de aplicação como componente construtivo.

1.2. Objetivos específicos:

- 1) Avaliar o desempenho físico e mecânico de painéis sanduíche com faces planas e núcleo corrugado (trapezoidal) de partículas de bagaço de cana-de-açúcar aglomeradas com resina PU-mamona.
- 2) Verificar por meio de uma avaliação teórica o potencial deste painel sanduíche para uso como componente construtivo.

2 REVISÃO DE LITERATURA

Com intuito de desenvolver um levantamento bibliográfico sobre a temática envolvida neste trabalho, foi realizada uma pesquisa em duas diferentes bases de dados. Nessa busca foi possível visualizar o avanço do interesse científico ao longo das décadas por painéis de partículas (*particleboards*) e a partir de que momento começaram a surgir pesquisas utilizando partículas de subprodutos agroindustriais (*bagasse*) como matéria-prima na produção desses painéis. Para refinar os resultados e encontrar publicações que tratassem especificamente do formato de painel abordado neste trabalho, foi feita uma busca utilizando os termos painel de partículas (*particleboard*) e núcleo corrugado (*corrugated core*) combinadamente.

Portanto essa busca dividiu-se em três etapas:

1. *Particleboard*;
2. *Particleboard and bagasse*;
3. *Particleboard and corrugated core*.

Os descritores utilizados na busca deveriam estar presentes no título, resumo ou palavras-chave dos artigos científicos. Foi possível observar neste levantamento que pesquisas científicas abordando painéis de partículas começaram a ganhar destaque na década de 1960, inicialmente com pesquisas originárias da Alemanha, abordando equipamentos, processos e matérias-primas para a manufatura desses painéis. O número de publicações cresceu significativamente ao longo das décadas, sendo que de 2004 em diante houve um notável avanço na quantidade de artigos abordando este assunto. O gráfico apresentado na figura 1 demonstra o total de trabalhos publicados ao longo das décadas sobre o tema “painéis de partículas” que apresenta um notável crescimento a partir da década de 1990.

Figura 1– Total de artigos publicados contendo o termo “particleboard”, bases de dados SCOPUS e WEB OF SCIENCE e aumento de publicações ao longo das décadas
Fonte: Própria autoria

Na segunda etapa da busca, onde foi acrescentado o termo *bagasse*, foi possível constatar que a proposta de utilização de resíduos agroindustriais para a produção de painéis de partículas já existe desde a década de 1970.

Hesch (1970) aborda perspectivas econômicas da utilização do bagaço de cana-de-açúcar para a produção de painéis particulados, neste trabalho o autor cita vantagens da utilização dessa matéria-prima em relação à madeira para essa função, incluindo propriedades superiores de resistência e baixo consumo de adesivo. O mesmo autor também afirma que em países onde existem áreas plantadas de cana-de-açúcar, o bagaço seria a matéria-prima mais favorável para a produção de painéis de partículas. No ano de 1980 ocorreram mais duas publicações tratando deste tema, uma delas nos Estados Unidos da América e outra na Europa. Dalen (1980) abordou a utilização do bagaço de cana-de-açúcar como uma matéria-prima com grande potencial para utilização no futuro, o autor justifica que com a diminuição da oferta de fibras e o aumento nos preços da madeira, o bagaço surgiria como uma alternativa mais atraente para o mercado de painéis. Heller (1980) discorreu sobre a utilização de matérias-primas não convencionais na manufatura de painéis de partículas, entre elas o bagaço de cana-de-açúcar, principalmente em regiões com escassez de oferta de madeira.

A partir de 1990 diversas publicações de artigos abordando diferentes tipos de adesivos, parâmetros de produção e matérias-primas não convencionais para a produção

de painéis particulados são encontradas. Alguns desses trabalhos estão apresentados no item 2.3 deste capítulo, onde é realizado a contextualização do estado da arte por meio de uma revisão de literatura específica sobre o tema “painéis de partículas de bagaço de cana-de-açúcar”. A figura 2 apresenta o resultado das pesquisas nas bases de dados abordando painéis particulados e bagaço de cana-de-açúcar.

Figura 2 - Total de artigos publicados contendo os termos “particleboard” e “bagasse”, bases de dados SCOPUS e WEB OF SCIENCE e aumento de publicações ao longo das décadas.

Fonte: Própria autoria

Na terceira busca “painéis de partículas com núcleo corrugado” foram obtidas poucas publicações, a saber: 7 documentos na Web of Science e 3 documentos na Scopus, todos publicados a partir da década de 1990. Por meio deste levantamento ficou evidenciado que o tema tratado neste trabalho pode ser considerado uma inovação tecnológica e foi possível analisar outros trabalhos que abordam temas semelhantes no quesito de formato dos painéis. Alguns destes trabalhos estão comentados no item 2.5 que trata especificamente de painéis sanduíche com núcleo corrugado.

A figura 3 apresenta a quantidade de trabalhos publicados sobre temas envolvendo painéis de partículas e núcleo corrugado.

Figura 3 – Total de artigos publicados contendo os termos “particleboard” e “corrugated core”, bases de dados SCOPUS e WEB OF SCIENCE e aumento de publicações ao longo das décadas.

No decorrer deste capítulo será apresentada a revisão de literatura abordando os principais temas que estão dentro do escopo dessa pesquisa. Mais especificamente, informações sobre painéis de partículas, o bagaço de cana como matéria-prima para a produção de painéis, adesivos utilizados e painéis sanduíche com núcleo corrugado.

2.2 Bagaço de cana-de-açúcar

A cana-de-açúcar é uma gramínea nativa das regiões tropicais do sul da Ásia. Foi na ilha de Nova Guiné, por volta do século VI a.C que essa planta começou a ser utilizada em construções e como fonte de alimento. O cultivo da cana-de-açúcar foi introduzido no Brasil pelos colonizadores por volta de 1530 e a cultura se adaptou muito bem ao clima brasileiro, influenciando o surgimento de vilarejos que mais tarde se tornariam grandes cidades, como Santos e São Paulo. Foi a primeira atividade econômica organizada no país e teve grande importância na história e no desenvolvimento do Brasil (ÚNICA,2016).

Após a primeira crise do petróleo, que ocorreu em 1973, o governo brasileiro criou o Programa Nacional do Alcool (Proálcool) e passou a investir na substituição em grande escala dos combustíveis oriundos do petróleo, por etanol derivado da cana-de-

açúcar, que foi considerado um combustível limpo e renovável, com potencial para contribuir com a redução na emissão de dióxido de carbono na atmosfera (MIRANDA, 2008).

Em meados de 1986, o Brasil enfrentava uma grave crise econômica e as vendas de automóveis movidos à etanol começaram a cair. No final da década de 1990 ocorreu uma significativa queda nas cotações internacionais do petróleo e com isso o governo passa a investir menos na produção de etanol. Após a Conferência Rio 92 onde foram discutidos meios para diminuir as emissões de carbono na atmosfera, a utilização do etanol como combustível foi considerada uma medida importante para diminuir as emissões de CO₂, visto que estudos apontavam que comparado à gasolina, veículos movidos a etanol eram consideravelmente menos poluentes (UNICA, 2016).

A partir de 2005, a maioria das indústrias sucroalcooleiras do Brasil se tornaram energeticamente autossuficientes pois passaram a gerar energia a partir da queima do bagaço da cana-de-açúcar, inclusive algumas delas passaram a vender o excedente de energia para a rede (UNICA, 2016). A utilização do bagaço para cogeração de energia é de grande importância para essas indústrias, inclusive para a demanda energética nacional, a proposta de utilização dessa matéria-prima para produção de painéis de partículas não visa concorrer com o setor da bioeletricidade, mas sim possibilitar outras alternativas de utilização dessa matéria-prima, agregando valor por meio da criação de um novo produto com possibilidade de utilizações em áreas como a construção civil e o setor moveleiro. Segundo Carvalho (2012) apesar do potencial de cogeração de energia que tem o bagaço, aproximadamente 28% do total não é aproveitado pelas indústrias.

O Brasil é o maior produtor mundial de cana-de-açúcar, segundo dados do (CONAB, 2018), a safra de 2017/2018 foi de aproximadamente 633,26 milhões de toneladas, isso representa uma enorme quantidade de subprodutos oriundos das indústrias sucroalcooleiras, entre eles o bagaço, que de acordo com Silva, Gomes e Alsina (2007) representa 30% do total produzido de cana-de-açúcar moída.

2.3 Painéis de partículas de madeira

A tecnologia de produção dos particulados de madeira teve origem na Alemanha na década de 1940, surgiu como alternativa a falta de madeira de qualidade para a fabricação de compensados. No entanto, o desenvolvimento dessa tecnologia ocorreu principalmente após a Segunda Guerra Mundial, impulsionado pela escassez de matéria-prima e para um melhor aproveitamento dos desperdícios gerados pela indústria

madeira e pela exploração florestal (CARASCHI et al., 2009). Esses painéis são feitos a partir de partículas de madeira aglomeradas com adesivos sintéticos ou resinas aglomerantes, o conjunto é prensado a quente por tempo suficiente para que ocorra a polimerização da resina (IWAKIRI et al., 2004).

No Brasil, a produção de painéis de partículas teve seu início na década de 60, com a utilização de cavacos de madeira de reflorestamento como pinus e algumas espécies de eucalipto (MARRA, 1992).

Os painéis de partículas, quando surgiram na Alemanha, eram chamados de aglomerados. Depois que a tecnologia de produção de painéis de partículas foi aprimorada nos Estados Unidos, passaram a ser classificados como MDP (*Medium density particleboard*) que possuem ampla utilização na indústria moveleira juntamente com o MDF (*Medium density fiberboard*). Segundo Iwakiri (2005) o MDP é constituído de três camadas: camada interna (CI) e camadas externas (CE), seguindo a proporção 1:3:1, sendo o núcleo mais espesso e com partículas de maiores dimensões do que as faces.

Atualmente, existem diversos outros tipos de painéis de madeira reconstituída, tais como Oriented strand board (OSB); Waferboard; High density particleboard (HDP) e Chapas de fibra dura (Hardboard). Segundo Barrero (2015) a principal diferença entre esses painéis é o tipo e tamanho das partículas utilizadas na produção.

2.4 Painéis de partículas de bagaço de cana-de-açúcar

Devido ao crescente aumento de investimentos dos setores públicos e privados na produção sucroalcooleira, o Brasil vem aumentando anualmente a área plantada de cana-de-açúcar, com isso a geração de bagaço demonstra um crescimento contínuo, com estimativa de produção de 285,5 milhões de toneladas para a safra de 2020/2021 (CONAB, 2015).

Segundo Mendes et al. (2010) resíduos lignocelulósicos provenientes da agroindústria estão disponíveis em quantidades suficientes para suprir as necessidades de matéria-prima do setor de painéis de partículas, essa substituição é vantajosa visto que a utilização destes subprodutos agroindustriais contribui para a diminuição da pressão sobre as florestas decorrente do aumento da demanda por painéis de madeira reconstituída. Neste contexto, vários estudos estão sendo realizados em diversas áreas do conhecimento almejando agregar valor ao bagaço de cana-de-açúcar, resultados apresentados por Fiorelli et al. (2011) e Sartori et al. (2012) indicam o potencial dessa matéria-prima para a produção de painéis de partículas homogêneas.

Batistelle et al. (2009) constataram que o bagaço de cana-de-açúcar possui potencial para a produção de painéis de partículas e as propriedades físico-mecânicas atendem às estabelecidas pelas normativas internacionais, com restrição de aplicação estrutural. Segundo Teixeira e Santana (1997) a estrutura lignocelulósica do bagaço “in natura” é composta por 45% de fibras lignocelulósicas, 50% de umidade, 2 a 3% de sólidos solúveis e 2 a 3% de sólidos insolúveis em água. Quimicamente, é constituída de celulose, hemicelulose e lignina, com concentrações de 41%, 25% e 20%, respectivamente. Os fungos são os principais causadores de danos em materiais lignocelulósicos, destacando-se os causadores da podridão parda, que destroem os polissacarídeos da parede celular e os da podridão branca, que destroem a lignina e assim alteram características físicas e diminuem a resistência mecânica do material (Oliveira et al., 1986 e Kirk et al., 1983). Condições que determinam a suscetibilidade à colonização por micro-organismos nos materiais lignocelulósicos são a umidade, a temperatura, e o pH do substrato (TEIXEIRA e SANTANA, 1997).

Vários fatores contribuem para a qualidade do produto final, dentre eles pode-se destacar: a densidade das partículas lignocelulósicas, densidade dos painéis, umidade das partículas, razão de compactação, tipo e quantidade de adesivo (MALONEY, 1993).

Na China, o bagaço de cana é utilizado como matéria-prima de alta qualidade na fabricação de painéis de média densidade, pois apresenta composição química similar à da madeira (CARVALHO, 2012).

O emprego de materiais lignocelulósicos provenientes da agroindústria na produção de painéis vem crescendo e possui uma tendência que essa demanda aumente, tendo em vista que o valor comercial desses painéis tem aumentado devido à crescente procura e consequente diminuição na oferta de madeiras comerciais e de reflorestamento (MENDES, 2003).

Segundo Teixeira e Santana (1997) a estrutura lignocelulósica do bagaço “in natura” é composta por 45% de fibras lignocelulósicas, 50% de umidade, 2 a 3% de sólidos solúveis e 2 a 3% de sólidos insolúveis em água. Quimicamente, é constituída de celulose, hemicelulose e lignina, com concentrações de 41%, 25% e 20%, respectivamente. Os fungos são os principais causadores de danos em materiais lignocelulósicos, destacando-se os causadores da podridão parda, que destroem os polissacarídeos da parede celular e os da podridão branca, que destroem a lignina e assim alteram características físicas e diminuem a resistência mecânica do material (Oliveira et al., 1986 e Kirk et al., 1983). Condições que determinam a suscetibilidade à colonização por micro-organismos nos materiais lignocelulósicos são a umidade, a temperatura, e o pH do substrato (TEIXEIRA e SANTANA, 1997).

Batistelle et al. (2009) constataram que o bagaço de cana-de-açúcar possui potencial para a produção de painéis de partículas e as propriedades físico-mecânicas atendem às estabelecidas pelas normativas internacionais, com restrição de aplicação estrutural.

Devido à baixa condutividade térmica, as partículas de bagaço de cana-de-açúcar configuram-se como material isolante, podendo ser usado como revestimento em coberturas, divisórias promovendo inércia térmica nestes ambientes (CARVALHO, 2012).

Mendes et al. (2014) produziram painéis de partículas de bagaço de cana, utilizando 8% de resina ureia-formaldeído, esses painéis foram avaliados juntamente com outros quatro tratamentos: T1) painel de Eucalipto, T2) painel de Pinus, T4) 50% Eucalipto e 50% bagaço, e T5) 50% Pinus e 50% bagaço. Os painéis que utilizaram eucalipto e bagaço obtiveram os melhores resultados. O tratamento T3 que utilizou 100% de bagaço obteve valores inferiores de adesão interna, e valores maiores de

inchamento e absorção de água no teste de imersão 24h, já às propriedades mecânicas também foram inferiores aos outros tratamentos, porém a diferença não é significativa.

Pedreschi (2009) comparou painéis de bagaço de cana produzidos em escala laboratorial usando diferentes tratamentos, com painéis fabricados em escala industrial provenientes da China e também, com os produzidos no Brasil com madeira de Eucalipto. Concluiu que o melhor tratamento foi obtido com os painéis produzidos em escala laboratorial que utilizou resina Melamina Uréia-fomaldeído (MUF) e, os painéis comerciais trazidos da China, mostraram-se estatisticamente muito semelhantes aos produzidos com madeira de Eucalipto no Brasil.

Bueno (2015) avaliou o potencial de utilização de painéis de partículas multicamadas, produzidos com subprodutos da agroindústria, entre eles o bagaço de cana-de-açúcar, foi observado que os painéis multicamadas apresentaram melhores propriedades físico-mecânicas, em comparação aos painéis homogêneos e atenderam aos requerimentos normativos nacionais e internacionais.

A tabela 1 apresenta valores médios de propriedades físico-mecânicas de alguns dos trabalhos que foram citados, juntamente com requisitos normativos para painéis de partículas.

Tabela 1 - Resultados de propriedades físico-mecânicas de painéis de partículas feitos com bagaço de cana-de-açúcar e requisitos normativos recomendados para painéis de madeira.

Autores/ Normas	ρ (kg/m³)	IE 24h (%)	MOR (MPa)	MOE (MPa)	AI
Pedreschi (2009)	650	11,39	15,76	2208,18	0,49
Fiorelli et. al (2013)	1000	15-20	22,6	2850	1,18
Bueno (2015)	700	23	16,20	1879	0,36
NBR 14810 (2013)	≤ 800	10-18	11-20	1800-3150	≥ 0,4
ANSI A208.1 (1999)	≤ 800	8	11-16,5	1725-2750	≥ 0,4

Fonte: Própria autoria

A norma NBR 14810:2013 indica diferentes classes de utilização para os painéis de partículas de média densidade de acordo com as condições de aplicação e faixas de espessura, já a norma americana ANSI A208 (1999) estabelece requisitos para painéis de alta, média e baixa densidade. Dos exemplos apresentados na tabela 1, com relação às propriedades mecânicas todos atendem aos requisitos mínimos de ambas as normas,

em especial Fiorelli et al. que avaliaram painéis de alta densidade, no entanto, as propriedades de inchamento desses trabalhos não foram totalmente satisfatórias, visto que os valores apresentados ultrapassam os requisitos mínimos exigidos pelas normas.

2.5 Adesivos orgânicos para produção de painéis de partículas

Adesivos são substâncias capazes de manter materiais aderidos por meio de uma adesão superficial. Esta adesão é resultado de forças atrativas intermoleculares de curta distância entre dois corpos com superfície de contato comum (KATSUKAKE, 2009).

Os adesivos usados como aglomerantes na produção de painéis de partículas podem ser classificados como inorgânicos (geralmente constituídos por silicatos e possuem alta resistência mecânica) e orgânicos que são divididos em dois tipos:

- De origem natural – adesivos de origem animal, amido, caseína, proteína vegetal, mamona e tanino (extraído de algumas espécies de árvores).
- De origem sintética – ureia-formaldeído, fenol-formaldeído, melanina e polivinil, entre outras (OLMOS, 1992).

Adesivos sintéticos podem ser classificados como termofixos que endurecem por meio da ação do calor ou de catalizadores e sua cura é irreversível (poliuretanos, ureia-formaldeído, fenol formaldeído) e termoplásticos que a cura é reversível (polietileno, polipropileno e borracha) (CAMPOS et al., 2005).

O adesivo é um fator muito importante a ser avaliado na produção de painéis, visto que pode chegar a custar 50% do valor total da produção (CARNEIRO et al., 2004)

As resinas mais utilizadas pela indústria de painéis de madeira são a base de formaldeído, em razão do baixo custo (BARRERO, 2015). No entanto, esses adesivos emitem formol no processo de fabricação dos painéis, o que provoca um efeito de grave insalubridade. (SILVA et al., 2012).

No ano de 2014, União Europeia classificou o formaldeído como agente cancerígeno (categoria 1B) e mutagênico (2) (SALTHAMMER, 2015).

Neste contexto, nos últimos anos tem sido estudada a utilização resinas para produção de compósitos que não sejam à base de formaldeído e sejam biodegradáveis. Essa tendência fez com que houvesse um avanço das pesquisas neste setor e isso levou a descoberta da resina poliuretana bi componente derivada do óleo de mamona. Esse adesivo é considerado impermeável e não agressivo ao meio-ambiente e ao ser-humano.

A partir do óleo de mamona (*Ricinus communis*), é possível sintetizar polióis e pré-polímeros que quando misturados dão origem ao poliuretano. A mistura feita a frio causa a reação de polimerização da resina (JOSÉ; BERALDO, 2006).

A mamona é encontrada em regiões tropicais e subtropicais, é uma planta muito abundante no Brasil, o óleo de mamona é um líquido viscoso obtido pela compressão das sementes (VILAR, 1993).

As resinas poliuretanas podem ser derivadas do petróleo ou de fontes naturais, no segundo caso têm-se os chamados “biomonômeros”, que são obtidos de fontes renováveis, como os óleos vegetais (SARTORI, 2012).

Além de não emitir formol, as resinas poliuretanas apresentam melhores propriedades mecânicas e alta resistência à umidade (DIAS, 2005). Na tabela 2 é possível observar resultados de trabalhos experimentais que utilizaram diferentes adesivos para a produção de painéis de partículas.

Tabela 2 - Propriedades físico-mecânicas de painéis particulados feitos com bagaço de cana e diferentes tipos de resina

Autores	Resina (%)	ρ (kg/m ³)	IE 24h (%)	MOR (MPa)	MOE (MPa)	AI (MPa)
Pedreschi (2009)	MUF (12)	650	11,39	15,76	2208,18	0,49
Fiorelli et. al (2013)	OM (15)	1000	20-15	22,6	2850	1,18
Mendes et. al (2012)	FF (12)	650	8,10	11,71	910,16	0,47
Sartori (2012)	OM (15)	950	20	22,60	2848	1,18
Mendes (2009)	UF (12)	650	11,81	10,71	659,52	0,28

OM: Resina PU bicomponente à base de óleo de mamona; MUF: Melamina ureia formaldeído; FF: Fenol formaldeído; UF: Ureia formaldeído

Fonte: Própria autoria

Por meio dos resultados apresentados na Tabela 2, é possível observar que os valores de adesão interna (AI) são superiores nos estudos que utilizaram resina PU-mamona na produção dos painéis, no entanto, deve-se considerar que o teor de resina e a densidade foram consideravelmente maiores nestes trabalhos. Portanto, apesar de ter sido usado maiores teores de resina, é notável que a PU-mamona possui alto potencial para utilização como adesivo em painéis de partículas considerando que os valores de adesão interna é um dos parâmetros para avaliar a eficiência do adesivo.

2.6 Painéis sanduíche

Uma estrutura sanduíche é constituída de duas faces de revestimento ligadas a um núcleo, as faces são geralmente finas em relação à espessura total do compósito e utiliza-se chapas de maior densidade e mais resistentes que o material do núcleo (CARLSSON & KARDOMATEAS, 2011).

A configuração de painel em formato sanduíche é vantajosa, pois combina alta rigidez na flexão e baixo peso (GAGLIARDO; MASCIA, 2010). Segundo Tita (2007), as faces têm função de suportar as tensões de tração, compressão e cisalhamento na flexão, já o núcleo deve ser rígido o suficiente na direção perpendicular às faces para evitar o esmagamento.

Materiais compósitos são importantes para indústria de transporte e possuem grande potencial para uso na construção civil. Os compósitos sanduíches possuem um design eficiente que auxilia na redução de peso e isolamento termo acústico. A figura 4 demonstra a composição de um painel sanduíche. Normalmente os núcleos são de baixa densidade e dependendo do formato proporciona uma maior eficiência estrutural ao compósito (WAY, 2015).

Figura 4 - Estrutura típica de um compósito sanduíche
Fonte: (WAY, 2015)

A utilização de compósitos sanduíche a base de madeira ainda é limitada, com exceção dos painéis isolantes estruturais (SIPs), que vem conquistando espaço dentro do mercado de materiais de construção ecológicos, por combinar isolamento, baixo peso e facilidade de montagem. Consistem em um painel sanduíche com faces OSB e núcleo leve e isolante de espuma (WAY, 2015). Os SIPs são projetados para substituir os

sistemas tradicionais de Light Steel Frame, dispensando a utilização de estruturas complementares, como é demonstrado na figura 5.

Figura 5 – Exemplo de construção utilizando painéis SIPs.
Fonte: APA- The Engineered Wood Association, 2013

Sistemas construtivos que utilizam painéis sanduíches proporcionam isolamento térmico e acústico e possibilitam construções mais leves e com maior rapidez na execução em relação às construções em alvenaria convencional. (GAGLIARDO; MASCIA, 2010).

Os painéis sanduíche funcionam de acordo com o mesmo princípio de projeto que as vigas-I. Dois revestimentos de alta resistência (análogos aos flanges) estão ligados a um núcleo leve (simulando a teia). O núcleo deve ser espesso em relação à espessura total do sanduíche, permitindo a separação das faces, situando-as o mais longe possível do eixo neutro, para formar um conjunto de tensões internas eficiente (CARLSSON e KARDOMATEAS, 2011); (HUNT e WINANDY, 2003).

A indústria aeroespacial é a que mais necessita de componentes de baixo peso, já que o projeto estrutural da aeronave é concebido principalmente em função do peso. Portanto, estruturas sanduíche vêm sendo usadas em aeronaves desde os tempos da Segunda Guerra Mundial, como no caso da aeronave “Mosquito” (ALLEN, 1969).

Já na indústria da construção civil sua utilização é mais recente, a partir da década de 1990, porém atualmente encontram-se disponíveis no mercado, componentes utilizados para divisórias, paredes, forros e lajes. Diferentemente da indústria aeroespacial, na área da construção civil o custo é um dos principais fatores a ser considerado no projeto, entretanto, o peso do sistema interfere nos custos e no desempenho da edificação (GAGLIARDO; MASCIA, 2010).

2.6.1 Painéis sanduíche com núcleo corrugado

Conforme definiu Allen (1969) as estruturas sanduíche podem possuir três diferentes configurações de núcleo, que são apresentadas na figura 6.

Figura 6 – Diferentes tipos de núcleo: (a) polimérico; (b) colmeia; (c) corrugado
Fonte: Allen (1969).

O Laboratório de Produtos Florestais (FPL), nos Estados Unidos, iniciou algumas pesquisas com painéis estruturais com núcleo corrugado. Hunt e Winandy (2003) desenvolveram um painel de fibras com núcleo corrugado utilizando como matéria-prima madeiras de pequeno diâmetro, propondo, no título do trabalho que o material seria um “*novo componente construtivo estrutural*”. Os autores apresentam algumas considerações em relação ao projeto da geometria do núcleo (figura 7), e sugerem uma análise teórica por meio de equações para determinar a falha esperada.

Figura 7 – Considerações importantes para o projeto da geometria do núcleo e variáveis usadas para descrever a geometria, para tensão de cisalhamento.

Fonte: (Hunt and Winandy, 2003)

Hunt (2004) investigou o efeito da geometria do núcleo, levando em consideração o ângulo da nervura e a espessura. Identificou que quando a relação comprimento/espessura da nervura aumenta, favorece a falha prematura na compressão. O autor, por meio de uma Análise de Elementos Finitos, indica que um ângulo das nervuras de 50° contribui para uma maior rigidez no ensaio de flexão. No caso do ensaio de compressão plana é indicado que um ângulo de 60° produz deformações menores antes de ocorrer a fratura.

Voth (2009) desenvolveu um modelo de painel sanduíche constituído de chapas OSB nas faces e núcleo corrugado visando oferecer alternativas aos OSB estruturais tradicionais. Estes OSB foram produzidos com densidade de 312 kg/m^3 e 8% de resina fenólica, o núcleo foi colado aos painéis planos por adesivo diisocianato modificado. White et al. (2015), estudaram as propriedades mecânicas deste tipo de painel avaliando a rigidez na flexão, e concluíram que há uma redução de 40% na quantidade de matéria-prima e um aumento de aproximadamente 70% na rigidez específica quando comparado com painéis OSB planos da mesma espessura.

Segundo Voth (2009) o formato de núcleo corrugado tem benefícios significativos para a indústria da construção, porque as cavidades ocas do núcleo permitem a passagem de condutores elétricos e encanamento. Ainda, segundo o autor, este tipo de painel tem potencial para aplicações como pisos, forros, paredes, prateleiras industriais, móveis e sistemas de construção, proporcionando desempenho estrutural e de isolamento térmico e acústico. A figura 8 apresenta o painel desenvolvido por Voth (2009) submetido a um teste de flexão.

Figura 8 - Painel OSB com núcleo corrugado em ensaio de flexão
Fonte: Voth (2009).

Way et al. (2016) avaliaram o desempenho estrutural de painéis sanduíche com faces OSB e núcleo moldado bidirecional (figura 9) de partículas de madeira. Devido à dificuldade encontrada para a determinação do momento de inércia para o núcleo moldado, o autor optou por apresentar valores de rigidez à flexão (EI) em vez do módulo de elasticidade.

Os resultados obtidos indicaram que este modelo de painel obteve um desempenho particularmente satisfatório na flexão, comprovando a capacidade estrutural do material, no entanto, é recomendado um aprimoramento nos sistemas de conexão para painéis adjacentes. O autor não propõe que o material abordado seja um substituto para os componentes de revestimentos disponíveis no mercado, mas que seja uma alternativa aos projetos de construções em que se deseja melhor desempenho e economia de material.

Figura 9 – Painéis OSB com núcleo moldado e os respectivos pontos de falha na flexão.
Fonte: Way (2016).

Painéis sanduíche com núcleo corrugado não devem ser projetados ou avaliados considerando a teoria básica das vigas, a natureza não-homogênea do material e o formato do núcleo permite diferentes critérios de falha do que aqueles considerados para vigas sólidas. De acordo com Davies (2001), os possíveis critérios de falha para painéis sanduíche leves são:

- Falha de tração nas faces.
- Falha por “enrugamento” das faces.
- Falha de cisalhamento do núcleo ou descolagem entre o núcleo e as faces.
- Falha de esmagamento da face e do núcleo no suporte.

2.7 Parâmetros de produção de painéis de partículas

Diversos fatores são determinantes e influenciam a qualidade do produto final no processo de produção de painéis de partículas, dentre eles, as características anatômicas da matéria-prima, a geometria e granulometria das partículas, o tipo e teor de resina utilizados e a densidade são fatores importantes a serem considerados. É possível adequar as propriedades físico-mecânicas dos painéis por meio do controle dos parâmetros de produção.

2.7.1 Geometria das partículas

A largura, espessura e comprimento determinam a geometria das partículas, a relação entre comprimento e espessura interfere nas propriedades mecânicas do painel (BARROS FILHO, 2009).

De acordo com a geometria e distribuição das partículas, os painéis podem ser classificados como homogêneos ou multicamadas. No caso dos painéis homogêneos, não há diferenciação no tamanho das partículas, já nos painéis multicamadas há uma distribuição controlada de diferentes tamanhos de partículas nas camadas do painel. É comum que as camadas externas sejam constituídas de partículas menores e o núcleo formado por partículas de maior comprimento. A configuração multicamadas confere ao painel um melhor acabamento da superfície externa e proporciona melhores propriedades tanto físicas como mecânicas (BUENO, 2015).

2.7.2 Umidade das partículas

O teor de umidade das partículas é um fator importante a ser considerado, pois pode afetar as características do painel. Valores de umidade mais altos podem reduzir o tempo de prensagem pelo fato das partículas estarem flexíveis, no entanto alto teor de umidade pode atrapalhar a cura da resina ou gerar acúmulo de vapor no interior do painel durante a prensagem, prejudicando a qualidade do painel. Já, um teor de umidade muito baixo influencia na transmissão de calor durante a prensagem e prejudica a adesão entre as partículas. O teor de umidade recomendado está entre 3 a 6% (BERTOLINI, 2011; MALLONEY, 1993).

2.7.3 Densidade e razão de compactação

A classificação de densidade dos painéis pode variar conforme o documento normativo. De acordo com Iwakiri (2005) a densidade dos painéis de partículas podem ser classificadas da seguinte forma:

- Baixa densidade: até 599 kg/m³
- Média densidade de 600 a 799 kg/m³
- Alta densidade: acima de 800 kg/m³

A densidade do painel é determinada pela razão entre massa e volume, algumas propriedades mecânicas como adesão interna e resistência à flexão tendem a melhorar com o aumento da densidade. Por outro lado, grande parte dos trabalhos publicados indicam que as propriedades físicas como absorção de água e inchamento em espessura aumentam com maiores densidades, devido à maior área de contato das partículas com a água (IWAKIRI et al., 2005).

Outro fator importante relacionado com a densidade e que afeta as propriedades do material é a razão de compactação, que indica o grau de densificação das partículas na estrutura do painel, é definida pela razão entre a densidade aparente do painel e a densidade aparente da madeira. Maloney (1993) indica valores ideais de razão de compactação para painéis de partículas de madeira na faixa de 1,3 a 1,6.

Fiorelli (2013) apresentou valores de razão de compactação variando de 0,6 a 0,8 para painéis de partículas produzidos com fibra de casca de coco e bagaço de cana-de-açúcar. Nesse estudo foi considerada a densidade real das partículas. As propriedades físico-mecânicas dos painéis avaliados atenderam aos requisitos

normativos, mesmo diferindo daqueles estabelecidos por Maloney (1993) que são para partículas de madeira.

2.7.4 Adesivo

O tipo e quantidade de adesivo é outro fator que interfere nas propriedades físico-mecânicas do painel. Segundo Barros Filho (2009), o adesivo pode vir a representar 30 a 60% do valor total de produção dos painéis. Os teores de adesivo utilizados na indústria de painéis variam entre 6 a 12% do peso seco da matéria-prima (BARROS FILHO, 2009).

Para determinar a quantidade e o tipo de resina a ser utilizada deve ser levado em conta a relação custo/benefício e se o painel será para uso interno ou externo (CHAMMA, 2004).

Nos painéis com configuração multicamadas pode haver variação nos teores de adesivo de cada camada, de acordo com a área superficial específica, sendo usado em maior concentração nas camadas externas que possuem partículas menores, e em menor concentração no miolo que é formado por partículas maiores (BARROS FILHO, 2009).

2.7.5 Processo de prensagem: Temperatura, tempo e pressão

No processo de prensagem à quente, a temperatura tem a função de acelerar a cura da resina, diminuindo assim o tempo de prensagem. Além disso a temperatura deve induzir a evaporação do excesso de umidade presente no colchão de partículas e diminuir a tensão superficial (BUENO, 2015).

Estudos que utilizaram resina PU de mamona na produção de painéis de partículas indicaram a viabilidade de utilizar como parâmetros de produção a pressão de 5 MPa, 100° C, por 10 min. (BUENO, 2015; FIORELLI et al., 2012; SARTORI, 2012).

2.8 Conclusão da revisão bibliográfica

Os subprodutos agroindustriais lignocelulósicos representam uma matéria-prima abundante e renovável que pode ser aproveitada industrialmente em diversos setores, como por exemplo na produção de painéis de partículas.

O bagaço de cana-de-açúcar é um subproduto gerado em grandes quantidades nas regiões produtoras dessa cultura, que é uma das principais cultivadas no Brasil. Diversas pesquisas já avaliaram o potencial da utilização do bagaço de cana-de-açúcar na produção de painéis de partículas, que possui características químicas-físico-mecânicas que possibilitam a aplicação em substituição à madeira na produção de painéis.

Os adesivos utilizados industrialmente na fabricação de painéis são em geral à base de formaldeído, um componente que é classificado pela União Europeia como cancerígeno. O surgimento de novos tipos de adesivos como a resina poliuretana à base de óleo de mamona representa uma alternativa mais sustentável de matriz para a produção de compósitos. Diversas pesquisas na área de painéis de partículas vêm utilizando essa resina e os resultados obtidos comprovam sua eficiência.

Painéis sanduíche combinam alta rigidez à flexão, baixo peso e isolamento térmico, por isso é um material bastante utilizado na indústria aeronáutica e vêm sendo também introduzido na indústria da construção civil, atendendo à tendência por construções leves e de fácil montagem, que representam economia de tempo e menores desperdícios no canteiro de obras.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Materiais

O bagaço de cana foi coletado em uma usina de produção de açúcar e álcool na região de Pirassununga. A resina poliuretana à base de óleo de mamona utilizada foi de especificação técnica AGT 1315, a qual é indicada para utilização como adesivo e aglomerante na produção de compósitos com fibras vegetais. Trata-se de uma resina à base de poliuretano vegetal (derivado do óleo de mamona), bi-componente, 100% sólido (isento de solventes) não liberando vapores tóxicos, o adesivo é originado a partir da mistura a frio de um pré-polímero (Componente A) e um polioliol (componente B). Segundo informações contidas na ficha técnica do produto, o polímero originado da mistura dos componentes, proporciona alta resistência à ação do intemperismo e alta impermeabilidade. Os compósitos obtidos com essa resina apresentam as seguintes características: durabilidade, grande resistência aos raios ultravioleta e excelente penetração nos poros do substrato, proporcionando boa aderência.

Para a produção do painel corrugado que compõe o núcleo, em laboratório, foi necessário desenvolver um processo de produção específico. A solução adotada para que o painel ficasse com uma distribuição homogênea de partículas ao longo do perfil trapezoidal foi utilizar no processo de moldagem, caibros de madeira cortados em seção trapezoidal nas mesmas dimensões dos trapézios do molde formador de painel acoplado à prensa termo-hidráulica. O processo de produção destes painéis é apresentado com mais detalhes no item 3.4.2.

3.2 Métodos

Foram avaliados três tratamentos no decorrer deste trabalho, o primeiro, foi um modelo experimental com faces e núcleo de média densidade (750 kg/m^3) e teor de adesivo 15% em todas as camadas, este modelo permitiu obter diretrizes para a elaboração e produção dos outros tratamentos (T2 e T3). O segundo tratamento utilizou faces e núcleo de baixa densidade (400 kg/cm^3) e o terceiro, faces de média densidade (650 kg/m^3) e núcleo de baixa densidade (500 kg/m^3). Todos os tratamentos utilizaram configuração multicamadas nas faces com objetivo de obter melhores propriedades físico-mecânicas. Os parâmetros de produção e os tratamentos avaliados estão apresentados nas tabelas 3 e 4, respectivamente.

Tabela 3 – Parâmetros de produção

Parâmetros de produção dos painéis	T1	T2 e T3
Dimensão das partículas da camada externa dos painéis de revestimento	0,3 a 0,6 mm	
Dimensão das partículas da camada interna dos painéis de revestimento	1,0 a 4,0 mm	
Dimensão das partículas utilizadas no núcleo corrugado	4,0 a 8,0 mm	
Proporção de resina para as camadas externas dos painéis planos	15%	15%
Proporção de resina para as camadas internas dos painéis planos	15%	12%
Proporção de resina utilizada no núcleo corrugado	15%	12%
Temperatura de prensagem	-	100° C
Pressão	-	5 MPa
Tempo de prensagem	-	10 min.

Tabela 4 – Plano experimental

Tratamento	Densidade (faces)	Densidade (núcleo)	Espessura (faces)	Espessura (núcleo)
T1	750 kg/m^3	750 kg/m^3	10 mm	15 mm
T2	400 kg/m^3	400 kg/m^3	10 mm	10 mm
T3	650 kg/m^3	500 kg/m^3	10 mm	10 mm

3.3 Produção dos painéis de partículas

Os painéis de partículas que constituem o painel sanduíche foram produzidos de acordo com a seguinte metodologia:

3.3.1 Painéis planos multicamadas

Após a coleta, o material foi acondicionado sobre uma lona em um galpão protegido da chuva e de outras fontes de umidade para uma pré-secagem natural, antes de ser colocado para secagem em estufa.

O procedimento utilizado para produção dos painéis de partículas segue as premissas indicadas por Maloney (1996) e adaptadas por Sartori (2012).

O material foi seco em estufa (60°C) por 24h até atingir umidade aproximada de 5%, posteriormente, foi picado em moinho de facas. O material processado foi colocado em um agitador mecânico da marca Proc-test e foram separadas as partículas com comprimentos de 0,3 - 0,6 mm (retidas na peneira de 0,2 mm) para serem utilizadas nas camadas externas dos painéis planos. Também foram separadas partículas de 1 a 4 mm para serem utilizadas na camada interna (miolo) dos painéis planos multicamadas.

Posteriormente foi determinado o teor dos elementos constituintes (massa de bagaço, teor de resina) para a produção de painéis planos com espessura de 10 mm e densidades nominais de 750 kg/m³; 400 kg/m³ e 650 kg/m³. A resina PU-mamona foi utilizada numa proporção de 15% do peso seco da matéria-prima na camada externa e 12% na camada interna. Os constituintes foram primeiramente misturados manualmente e em seguida colocados em um misturador circular por 5 min. para homogeneização, posteriormente o material foi colocado em uma caixa formadora com dimensões de 40 x 40 x 20 cm, respeitando a proporção de 1:3:1 (face-miolo-face) e após a moldagem e pré-prensagem, o colchão de partículas foi levado a prensa termo-hidráulica, onde foi aplicada uma carga de 5 MPa, por 10 min., a uma temperatura de 100°C. A figura 10 ilustra as etapas deste processo.

Figura 10 – Etapas de produção do painel plano. a) Material pronto para ser misturado com o adesivo. b) Moldagem do colchão de partículas. c) Colchão de partículas introduzido na prensa termo-hidráulica. d) Painel após a prensagem.

Fonte: Própria autoria.

3.3.2 Produção do núcleo corrugado

Para a moldagem dos painéis no formato trapezoidal em escala laboratorial foram necessários alguns ajustes no processo, visando melhorar a qualidade final do produto. Os parâmetros de produção de painéis planos foram adaptados e houve um desenvolvimento experimental para viabilizar a produção de painéis no formato trapezoidal. Para isto, foi utilizado um molde metálico, com formato corrugado, que é constituído de duas partes: inferior e superior. A parte inferior é usada para formar o colchão de partículas e a parte superior é acoplada à prensa para que o colchão seja prensado no formato corrugado. A figura 11 demonstra a geometria do molde metálico e sua parte superior conectada à prensa.

Figura 11 - Molde utilizado para a produção dos painéis trapezoidais. a) Parte inferior da forma. b) Colchão de partículas sobre o molde trapezoidal. c) Colchão de partículas a ser prensado.

Fonte: Própria autoria.

Nas primeiras tentativas de prensagem dos painéis neste formato ocorreram falhas no processo. Foi observado que quando o colchão de partículas é colocado da maneira como apresenta a Figura 12 (c), ocorre uma diferença na distribuição de massa ao longo do painel. Isso ocorreu porque o primeiro contato da parte superior do molde

com o colchão de partículas durante a prensagem, proporcionou um deslocamento de uma quantidade de partículas da parte superior, que faz com que o cume dos trapézios fique com quantidade reduzida de partículas, provocando uma rachadura longitudinal no painel (figura 12).

Figura 12 – Falhas ocorridas nas primeiras tentativas de moldagem dos painéis trapezoidais. a) Painel ainda no molde com rachaduras nas faces superiores dos trapézios b) Detalhe do tipo de falha. c) Painéis retirados do molde apresentando falhas.

Fonte: Própria autoria

Este método além de produzir falhas visíveis, fez com que ocorresse uma considerável diferença de densidade ao longo do eixo transversal do painel.

Para solucionar este problema, foram utilizados caibros de madeira cortados em seções trapezoidais de acordo com as dimensões do molde para que durante o processo de montagem do colchão esses elementos fossem usados para nivelar a diferença de massa que ocorre na montagem do colchão de partículas, devido ao formato do molde. Para isso, foi mensurada a quantidade de massa necessária para preencher os sulcos criados após a colocação dos caibros na caixa formadora de 40 x 40 x 20 cm e essa porção foi separada. A caixa formadora foi posicionada sobre a parte inferior do molde trapezoidal e preenchida com a matéria-prima, em seguida foram colocados os caibros de madeira sobre o colchão nas devidas posições dentro da caixa, isso gerou sulcos entre um caibro e outro que foram preenchidos com o material reservado. Feito isso, a caixa formadora do colchão pode ser tampada para a realização da pré-prensagem, como apresentado na Figura 13 (c). Após este processo, os caibros de madeiras foram retirados da caixa e o colchão de partículas no formato corrugado introduzido na prensa termo-hidráulica.

Figura 13 – Moldagem dos painéis trapezoidais com ajustes no processo. a) Caibros de madeira cortados no formato trapezoidal. b) Posicionamento dos trapézios de madeira no molde formador. c) Pré-prensagem d) Resultado da pré-prensagem.

Fonte: Própria autoria.

Os painéis trapezoidais foram produzidos com espessuras de 15 mm (T1) e 10 mm (T2 e T3) e densidade nominal de 750 kg/m³; 400 kg/m³ e 500 kg/m³. Foi utilizada PU-mamona numa proporção de 12% do peso seco da matéria-prima.

O material foi seco em estufa (60°C) até atingir umidade aproximada de 5%, a seguir foi picado em moinho de facas com malha de 8 mm. Posteriormente, o material foi colocado em um agitador mecânico para peneiragem e foram separadas as partículas com comprimentos de 4 - 8 mm.

As partículas foram homogeneizadas com a resina em um misturador circular por 5 minutos, posteriormente a mistura foi levada à caixa formadora, e em seguida prensado a uma pressão de 5 MPa, por 10 min., em uma temperatura de 100°C.

3.3.3 Colagem das faces planas ao núcleo corrugado

A colagem das faces planas ao núcleo foi feita com adesivo PU-mamona. Uma quantidade de 49 g de resina foi pesada e dividida de forma equivalente em 7 recipientes para que fosse aplicada uma quantia de 7g de resina em cada superfície de contato do painel trapezoidal com as chapas planas (outros teores de adesivo foram testados na colagem dos painéis durante o desenvolvimento experimental, porém a interface de ligação que obteve melhores resultados foi utilizando 7g de resina em cada superfície de contato entre o núcleo e as faces). Posteriormente foi utilizada uma prensa com ajuste de pressão manual (Figura 14), onde, por meio de um torquímetro, aplicou-se um torque de aproximadamente 46 N.m em cada parafuso. O tempo utilizado para a colagem foi de 24 horas para que a cura da resina fosse completa.

Figura 14 – Colagem de dois conjuntos na “prensa” com ajuste de pressão manual.

Fonte: Própria autoria

3.4 Caracterização dos painéis de partículas

Neste item são apresentadas as metodologias de caracterização do painel sanduíche, sendo que nos ensaios de densidade, inchamento em espessura e adesão interna foram avaliados apenas amostras dos painéis planos (faces), pois não há metodologias específicas para estes ensaios em painéis sanduíche com núcleo corrugado, mas para painéis de partículas são caracterizações importantes de serem apresentadas. Portanto apenas os ensaios de flexão avaliaram o conjunto completo.

3.4.1 Densidade aparente dos painéis planos e densidade nominal do conjunto

Para a caracterização física dos painéis planos, foi realizado o ensaio de densidade seguindo recomendações da norma NBR 14810: 2013. Foram confeccionados corpos de prova nas dimensões 50 x 50 mm que foram medidos em paquímetro digital e pesados em balança analítica. O cálculo da densidade aparente dos painéis planos foi realizado por meio da equação 1:

$$\rho = \frac{M}{V} * 1000 \quad (1)$$

Onde:

ρ = densidade do CP em kg/m³;

M = massa do CP em g;

V = volume do CP em mm³.

Por conta da dificuldade em calcular a densidade do núcleo ou mesmo do painel sanduíche pelos métodos convencionais, devido à geometria da seção e os espaços vazios do núcleo, foi adotada uma metodologia para a determinação da densidade nominal do painel sanduíche a partir de cálculos de geometria com auxílio do software AutoCAD. Os corpos de prova foram escaneados (figura 15) e as imagens obtidas foram exportadas para o AutoCAD, em seguida as imagens foram formatadas para escala real e foi possível obter os valores de área, massa e volume das faces e núcleo, necessárias para o cálculo da densidade. A massa foi calculada considerando a densidade nominal de cada painel após a determinação da área e o volume dos mesmos. Foram utilizadas as seguintes equações:

$$M = \rho * V \quad (2)$$

$$M_{\text{total}} = M_{\text{faces}} + M_{\text{núcleo}} \quad (3)$$

$$V_{\text{total}} = l * c * e \quad (4)$$

$$\rho = \frac{M_{\text{total}}}{V_{\text{total}}} \quad (5)$$

Onde:

M = massa individual de cada painel

l = largura da amostra

c = comprimento da amostra

e = espessura total da amostra

Figura 15 – Imagens escaneadas dos corpos de prova para o cálculo da área, volume e massa.

Fonte: Própria autoria

3.4.2 *Inchamento em espessura*

O ensaio de inchamento em espessura (IE) é um teste amplamente utilizado pelas indústrias de painéis para determinar as propriedades de resistência a umidade.

O inchamento em espessura foi avaliado apenas para os painéis das faces de revestimento, já que estes que teriam maior contato com fontes de umidade na sua utilização. Foram confeccionadas 10 amostras de cada tratamento com 50 x 50 x 10 mm e determinada a espessura com paquímetro digital, com resolução de 0,01 mm. As amostras foram colocadas em um recipiente com água em temperatura ambiente de modo que todos ficassem submersos. Após 24 horas de imersão os CP foram retirados do recipiente e novamente foi medida a espessura. O IE é determinado pela equação 7.

As análises dos resultados foram feitas com base nas normas NBR 14810-2: 2013 e ANSI A208.1:1999.

$$IE = \frac{E1 - E0}{E0} * 100 \quad (6)$$

Onde:

I = Inchamento em espessura do CP (%)

E₁ = Espessura do CP após o período de imersão (mm)

E₀ = Espessura do CP antes da imersão (mm)

3.4.3 Adesão interna

A adesão interna (AI) das partículas é determinada pelo ensaio de tração perpendicular. Este ensaio foi realizado com o intuito de demonstrar a eficiência do adesivo na coesão entre as partículas. Foram avaliadas apenas as faces dos três tratamentos, visto que não há metodologia específica para este ensaio em painéis sanduíche e seria inviável confeccionar amostras do painel trapezoidal, no entanto, a adesão interna é uma propriedade importante de ser avaliada para painéis de partículas.

Para a determinação da adesão interna foram confeccionados 10 CP dos painéis planos de cada tratamento, com dimensões de 50 x 50 x 10 mm e antes do ensaio foi determinada a área superficial de cada corpo de prova com paquímetro digital com resolução de 0,01 mm. Os CP foram colados em blocos metálicos para possibilitar a realização do ensaio de tração perpendicular que foi realizado em uma máquina universal de ensaios mecânicos, da marca EMIC, modelo DL 30.000A, a velocidade de ensaio foi de 4 mm/min. A figura 16 demonstra o corpo de prova colado no dispositivo, pronto para ser submetido ao ensaio.

Para determinar os valores de AI foi utilizada a equação 7:

$$AI = \frac{P}{S} \quad (7)$$

Onde:

AI = adesão interna das partículas

P = carga de ruptura

S = área da superfície do CP (mm²)

Figura 16 – Bloco de tração e amostra colada.

Figura 17 – Momento do ensaio após o rompimento por tração perpendicular

3.4.4 Ensaio de flexão (ASTM C 393 M-16)

Este ensaio foi realizado por ser indicado para avaliar o desempenho à flexão de painéis sanduíche e fornece parâmetros para avaliar os modos de falha, sendo possível obter propriedades como rigidez à flexão, rigidez de cisalhamento e módulo de cisalhamento do núcleo.

O ensaio de flexão seguiu recomendações da norma ASTM C393 M-16:2016 - *Standart Test Method for Core Shear Properties of Sandwich Constructions by Beam Flexure*. Após a produção dos painéis sanduíche foram confeccionados 6 corpos de prova (CP) no sentido longitudinal de 120 x 250 mm e 6 no sentido transversal de 120 x 362,5 mm. As dimensões dos CP foram ajustadas de acordo com a geometria do núcleo corrugado para que cada amostra longitudinal representasse uma seção que se repete no eixo transversal (figura 18). A geometria padrão dos CP que a norma estabelece é de 75 x 200 mm, porém, se fosse adotada essa configuração, os corpos de prova não abrangeriam uma célula inteira do núcleo, portanto optou-se por ajustar a geometria dos CP seguindo as recomendações da norma para a utilização de amostras não padronizadas.

Os painéis sanduíche de 400 x 400 mm e aproximadamente 60 mm de espessura foram cortados em seções como é apresentado na figura 18, para a obtenção dos corpos de prova longitudinais (120 x 250 mm) e transversais (120 x 362,5 mm).

Figura 18 – Imagens demonstrativas de como foram determinadas as dimensões dos corpos de prova para o ensaio de flexão.

Fonte: Própria autoria

Este ensaio avaliou as propriedades de cisalhamento do núcleo de um painel sanduíche sujeito a flexão. Foi realizado em uma máquina universal de ensaios mecânicos, da marca EMIC, modelo DL 30.000. A velocidade de ensaio utilizada foi de 6 mm/min. e a configuração de flexão em 3 pontos com distância entre apoios de 200 mm.

Figura 19 – Imagens do ensaio de flexão (longitudinal). a) Geometria do corpo de prova (ajustado para abranger uma célula inteira do núcleo). b) CP posicionado na máquina. c) CP após a falha.

Figura 20 – Imagens do ensaio de flexão (transversal). a) Geometria dos corpos de prova. b) CP posicionado na máquina. c) CP após a falha.

Fonte: Própria autoria

Para a determinação da rigidez à flexão do painel foi utilizada a equação 8:

$$EI = \frac{P * L^3}{\Delta * 48b} \quad (8)$$

Onde:

EI = Rigidez à flexão (N-mm²/mm)

P = Força no limite de proporcionalidade (N/mm)

L = distância entre apoios (mm)

Δ = deformação no limite de proporcionalidade (mm)

b = largura do CP (mm)

Para o cálculo do momento máximo por milímetro da largura do CP foi utilizada a equação 9:

$$FbS = \frac{PL}{4b} \quad (9)$$

Onde:

FbS = Momento máximo (N-mm/mm)

P = Força máxima (N/mm)

L = distância entre apoios (mm)

A norma ASTM D7250/D7250M-16:2018 fornece equações para o cálculo de propriedades de painéis sanduíche como a rigidez e o módulo de cisalhamento com base em resultados obtidos em ensaios da norma ASTM C393 M-16.

Para a determinação da rigidez de cisalhamento (U) foi utilizada a equação 10, onde, por meio de substituição de valores, tendo disponíveis os valores de deflexão e rigidez à flexão, foi possível obter a propriedade desejada.

$$\Delta = \frac{PL}{48 * EI} + \frac{PL}{4U} \quad (10)$$

Tendo obtido o valor de U, o módulo de cisalhamento (G) foi calculado por meio da equação 11:

$$G = \frac{U(d - t)}{(d - t)^2 b} \quad (11)$$

Onde:

Δ = deflexão (mm)

P = carga no limite de proporcionalidade (N)

L = Comprimento do vão (mm)

U = rigidez de cisalhamento (N)

d = espessura do painel sanduíche (mm)

t = espessura da face (mm)

b = largura da amostra (mm)

G = módulo de cisalhamento (MPa)

3.5 Avaliação teórica do potencial de aplicação do material como componente construtivo

Para a avaliação da capacidade estrutural do material desenvolvido neste trabalho, foi feita uma análise teórica orientada pela APA - Panel Design Specification (APA The Engineered Wood Association, 2012), simulando a aplicação do painel como piso estrutural. Foi considerado um comprimento de vão de 1219,2 mm (48 polegadas), que é o máximo comprimento de vão utilizado para painéis estruturais classificados pela APA (2012).

A partir de propriedades mecânicas obtidas nos ensaios de flexão, como o momento máximo (FbS), e a rigidez na flexão (EI), foi possível aplicar esses valores nas equações 12 – 14 (APA, 2012) para obter a carga máxima admissível para que o painel falhe na flexão (equação 16) e a carga máxima com base nos limites de deflexão (equação 18). Os cálculos foram realizados utilizando as unidades americanas, por ser o modelo de unidades adotado pela APA (2012), em seguida os valores foram convertidos para o Sistema Internacional de Unidades (SI).

$$Wb = \frac{96 * FbS}{l^2} \quad (12)$$

Onde:

Wb = carga uniforme admissível com base na capacidade de resistência à flexão do painel (psf)

FbS = capacidade de resistência a flexão do material (lbf-in./ft)

l = distância entre apoios (in.)

$$\Delta = \frac{w.l^4}{2220.EI} \quad (13)$$

Onde:

Δ = deflexão (in.)

w = carga uniforme assumida = 1 psf

l = vão livre + fator de suporte "FS" (in.)

FS = O fator da largura do suporte é igual a 0,25' para suportes de madeira serrada com largura nominal de duas polegadas.

EI = Rigidez à flexão do painel (lb-in.²/ft)

$$W_d = \frac{\Delta_{all}}{\Delta} \quad (14)$$

W_d = Carga uniforme com base na deflexão

Δ_{all} = deflexão admissível

Δ = deflexão calculada

A deflexão admissível é dada por $l/240$ para cargas acidentais e $l/360$ para carregamentos totais (IBC, 2012).

As propriedades dos painéis sanduíche produzidos nesta pesquisa foram comparadas com as de painéis OSB para diversas aplicações, essa comparação foi feita uma vez que o uso proposto para os painéis sanduíche de partículas de bagaço de cana-de-açúcar é o mesmo que os utilizados para painéis OSB na construção civil, como pisos e vedações horizontais e verticais.

A norma PS-2-10 (APA The Engineered Wood Association, 2011) apresenta valores de painéis OSB (EI e momento máximo) para três classes de aplicação: vedação, estrutural e piso. Essas normas citadas (APA, 2011 e APA, 2012) foram as únicas referências encontradas na literatura que fornecem requisitos para as propriedades mecânicas que foram avaliadas neste estudo e para as aplicações na construção civil previstas para o material.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Este item apresenta os resultados da caracterização física dos painéis planos (faces) e a caracterização mecânica dos painéis sanduíche produzidos em escala laboratorial, também apresenta uma avaliação teórica do potencial de aplicação na construção civil.

4.1 Densidade

4.2.1 Densidade aparente dos painéis planos

A tabela 5 apresenta os dados de densidade aparente do painel no formato plano. Foi utilizada a média aritmética da densidade de cinco amostras de cada tratamento e como medida de dispersão foi adotado o desvio padrão e o coeficiente de variação (CV).

Tabela 5 – Densidade aparente dos painéis planos

	T1	T2	T3
Média (kg/m ³)	679 ± 25	429 ± 20	613 ± 8
CV (%)	3,68	4,7	13,4

Os valores obtidos de densidade aparente diferem razoavelmente da densidade nominal prevista para os painéis, essa diferença pode estar associada ao processo de manufatura laboratorial. Em relação às medidas de dispersão, houve um pequeno coeficiente de variação para o T1 e T2 está dentro da tolerância de 7% especificada pela norma NBR 14810: 2013, já o T3 ultrapassou a tolerância de variação em relação à média de densidade.

Os tratamentos T1 e T3 se enquadram na classificação de painéis de média densidade e o T2 configura-se como painel de baixa densidade.

4.2.2 Densidade nominal do conjunto

De acordo com a metodologia mencionada no item 3.5.1 que foi elaborada para o cálculo da densidade do conjunto, os valores médios estimados de densidade nominal dos painéis sanduíche são apresentados na tabela 6.

Tabela 6 – Densidade nominal do painel-sanduíche

	T1	T2	T3
Densidade - seção retangular (kg/m ²) $\rho = M_{\text{total}}/\text{comp.}*\text{largura}* \text{espessura}$	384,44 ± 12,9	204,96 ± 19,75	323,93 ± 8,37
CV (%)	3,36	9,36	2,81
Densidade - desconsiderando os espaços vazios (kg/m ²) $\rho = M_{\text{total}}/V_{\text{face.}}+ V_{\text{núcleo}} + V_{\text{face}}$	769,37 ± 14,86	392,15 ± 36,73	597,69 ± 18,19
CV (%)	1,93	9,36	3,04

A tabela apresenta valores médios de densidade do conjunto, primeiro considerando o volume total como se fosse um elemento maciço, pois no caso esse volume representa o espaço verdadeiro que o material ocupa em sua aplicação. Mas também foram apresentados os valores considerando o volume total como a somatória do volume dos três elementos (face-núcleo-face), desconsiderando os volumes dos espaços vazios.

Os resultados apresentados demonstram, no primeiro caso, que todos os tratamentos avaliados se enquadram na categoria de painéis de baixa densidade. No segundo caso, o T1 se enquadra na categoria de média densidade e T2 e T3 permanecem com média densidade. Nos resultados do segundo caso, a densidade do conjunto é praticamente equivalente à densidade nominal pré-estabelecida para os painéis individualmente.

A metodologia adotada para estes cálculos pode ser considerada como alternativa para determinar a densidade aproximada de materiais com configuração heterogênea como é o caso dos painéis sanduíche com núcleo corrugado.

4.2 Inchamento em espessura

Os resultados de Inchamento em espessura (IE) para os painéis das faces de revestimento estão apresentados na tabela 7. Os valores são apresentados de acordo com a média aritmética e como medidas de dispersão foram utilizados desvio padrão e coeficiente de variação (CV).

Tabela 7 – Valores de IE das faces

24h	T1	T2	T3
Média (%)	6,3 ± 0,59	11,2 ± 0,94	25,2 ± 11,09
CV (%)	9,37	8,4	44,0

A norma NBR 14810-2: 2013 fornece requisitos para painéis de partículas de média densidade de acordo com faixas de espessura nominal e sugere seis classes de uso. Para painéis com espessura nominal de 10 mm os requisitos de IE para cada classificação de painel são:

- P2 – painéis não estruturais para uso interno e condições secas ($IE \geq 18\%$)
- P3 – painéis não estruturais para uso em condições úmidas ($IE \geq 17\%$)
- P4 – painéis estruturais para uso em condições secas ($IE \geq 19\%$)
- P5 – painéis estruturais para uso em condições úmidas ($IE \geq 13\%$)
- P6 – ___ para condições severas de carga em ambientes seco ($IE \geq 16\%$)
- P7 – ___ para condições severas de carga em ambientes úmidos ($IE \geq 10\%$)

O primeiro tratamento atendeu todos os requisitos da norma brasileira, inclusive para aplicação em ambientes úmidos, sob condições severas de carga. O tratamento dois também obteve resultados que atendem aos requisitos das classes de painéis da norma brasileira, com exceção do P7. O terceiro tratamento, porém, apresentou valores de inchamento acima dos recomendados pela norma internacional ANSI A208.1:1999 que exige valores até 8% e também ultrapassou os valores máximos admitidos pela NBR 14810-2:2006, tendo atendido apenas aos requisitos da norma CS-236-66:1968 onde os valores para painéis de baixa densidade e de média densidade são 30% e 25-35%, respectivamente.

A figura 21 apresenta os valores obtidos no ensaio de inchamento comparado aos requisitos normativos.

Figura 21 - Gráfico que apresenta os valores de IE e as recomendações normativas.

O tratamento 1 foi o único em que foi utilizada uma proporção de resina de 15% tanto nas camadas externas como nas camadas internas, devido a este fator as propriedades de inchamento foram totalmente satisfatórias. Nos tratamentos T2 e T3 a proporção de adesivo nas camadas externas foi de 15% e nas camadas internas 12%. Conforme mencionado na revisão de literatura, densidades mais altas favorecem um maior inchamento, como é possível observar que o T3 ($0,650 \text{ g/cm}^3$) obteve valores substancialmente mais altos de inchamento do que o T2 ($0,400 \text{ g/cm}^3$). Por meio dos resultados apresentados é constatado que o teor de adesivo contribui extremamente para as propriedades de inchamento. O T1 obteve valores de inchamento inferiores aos apresentados por Sartori (2012); Fiorelli et. al (2013) e Bueno (2015), comprovando a eficiência da resina (PU mamona) utilizada neste trabalho para alcançar propriedades satisfatórias de inchamento em espessura.

4.3 Adesão interna

Pelo ensaio de tração perpendicular foi avaliada a adesão interna (AI) das partículas dos painéis planos, que pode ser descrita como a força de coesão das partículas com o adesivo (BARROS FILHO, 2009). Os valores estão apresentados na tabela 8.

Tabela 8 – Valores de AI das faces

	T1	T2	T3	NBR (2013)
Média (MPa)	1,60 ± 0,30	0,43 ± 0,04	0,28 ± 0,14	0,4 - 0,75
CV (%)	19,10	9,30	52,8	-

De acordo com os resultados apresentados, o T1 obteve baixos valores de adesão interna, atendendo todos os requisitos da norma brasileira e também para painéis de alta densidade estabelecido na norma ANSI A208.1:1999. O T2 atendeu aos requisitos dos painéis Tipo P2 e P4 da norma NBR 14810-2: 2013 e pelas recomendações da norma ANSI, pode ser indicado para uso comercial. No entanto, o T3 obteve valores abaixo do esperado e não atingiu os requisitos mínimos especificados pelos documentos normativos. A figura 22 apresenta o gráfico dos resultados obtidos e a linha vermelha representa o requisito normativo mínimo para adesão interna de acordo com a NBR 14810: 2016.

Figura 22- Gráfico que apresenta os valores de AI e as recomendações normativas.

A diferença substancial dos resultados do T1 para os outros tratamentos se deve ao teor de adesivo que foi de 15% nas três camadas do painel, já para o T2 e T3 o teor foi menor para a camada interna: 15-12-15%. O motivo do T3 ter apresentado valores inferiores ao esperado e um grande coeficiente de variação, pode ter sido pelo fato dos painéis deste tratamento terem sido produzidos por último, durante a fase experimental da pesquisa e o prazo de validade da resina estar próximo ao vencimento. Durante o manuseio foi notado uma diferença na viscosidade da resina, mas como estava dentro do prazo de validade os painéis foram produzidos e não foi identificado nenhum problema de adesão, porém os resultados para o ensaio de adesão interna não foram satisfatórios.

4.4 Ensaio de flexão

A partir dos ensaios realizados com base na norma ASTM C 393 M-16, foram obtidas as propriedades mecânicas apresentadas na tabela 9. Devido ao formato do painel, optou-se por apresentar as propriedades de rigidez à flexão, momento máximo (F_bS), força máxima, rigidez e módulo de cisalhamento. Os valores são apresentados de acordo com a média aritmética e adotou-se o coeficiente de variação como medida de dispersão.

Tabela 9 – Propriedades mecânicas dos painéis sanduiches de faces planas e núcleos trapezoidais.

TRATAMENTOS			Força máx. na flexão (N)	Deflexão relativa à força máxima (mm)	F_bS (MPa)	E.I Rigidez à flexão (N-mm ² /mm)	U Rigidez de cisalhamento do núcleo (N)	G Módulo de cis. do núcleo (MPa)
T1	Eixo	Média	11391	3,01	4746	7165.339	257982	31,76
	Long.	C.V %	13,3	17	11	7	7,2	7
	Eixo	Média	7028	5,97	2928	2556.214	92054	11,33
	Trans	C.V %	10,8	20,7	8,4	9,2	11	11
T2	Eixo	Média	2093	3,1	897	1273.275	43614	5,86
	Long.	C.V %	19	26	20	25,4	23,9	23,9
	Eixo	Média	1065	4,83	488,5	456.052	16355	1,88
	Trans	C.V %	14,2	32,5	9,5	5,2	5,2	21
T3	Eixo	Média	3003	3,1	1199	2186.158	74828	9,8
	Long.	C.V %	24,2	18,5	29,9	27,5	26,4	22,5
	Eixo	Média	1951	5,9	819,4	732.566	26567	3,5
	Trans	C.V %	19,1	23	19	10,8	8,6	11,6

De acordo com os resultados, foi observado que o T1 alcançou valores de força máxima de ruptura na flexão elevados para painéis de partículas. A geometria do núcleo contribuiu para o incremento do momento de inércia, avaliado nesse estudo pela rigidez à flexão (E.I). A diferença considerável dos valores obtidos para o tratamento T1, em comparação com os tratamentos T2 e T3 tem relação com a densidade dos painéis. Os tratamentos T2 e T3 alcançaram propriedades similares à valores encontrados na literatura para OSB's com núcleo corrugado. Voth (2009) apresenta valores médios de rigidez à flexão de 858.648 (N-mm²/mm) para amostras ensaiadas no eixo longitudinal e 288.099 (N-mm²/mm) para o eixo transversal. O mesmo autor apresenta valores de 24.198 e 14.234 (N) para rigidez de cisalhamento; 6,75 e 3,96 (MPa) para o módulo de

cisalhamento do núcleo e força máxima de 2708 e 698 (N) nos eixos longitudinais e transversais, respectivamente.

Os gráficos apresentados nas figuras 23-25 demonstram os valores de força e deformação e o limite de proporcionalidade médio para cada tratamento, foram selecionadas três amostras representativas de cada tratamento, no eixo longitudinal e transversal para serem diagramadas nos gráficos.

Figura 23 – Variação da força pela deformação - T1

Figura 24 – Variação da forma pela deformação - T2

Figura 25 – Variação da força pela deformação - T3

Os CP ensaiados no eixo longitudinal apresentaram valores superiores de propriedades mecânicas em relação aos transversais. Esta característica é semelhante ao caso de painéis orientados ou compensados multicamadas que possuem “eixo forte” e “eixo fraco”. A primeira falha observada durante os ensaios foi o descolamento da interface de ligação entre as faces e o núcleo (como mostra a figura 26), que é uma das falhas previstas para este ensaio, de acordo com a ASTM C393 M-16 esta é uma falha tipo (d). O segundo modo de falha foi o cisalhamento do núcleo. Os ensaios foram bem-sucedidos, pois os únicos tipos de falha aceitáveis para este tipo de ensaio são: o descolamento da interface de ligação e o cisalhamento do núcleo. A falha das faces antes de ocorrer o cisalhamento do núcleo não é um modo de falha aceitável (ASTM C393-M, 2016).

Figura 26 – Detalhes dos tipos de falha: a) Amostra longitudinal após o descolamento da fase inferior. b) Amostra transversal após ensaio, com sinais de descolamento da fase inferior e cisalhamento no núcleo. c) Detalhe da falha por cisalhamento do núcleo em uma amostra transversal.

Fonte: Própria autoria

Os painéis avaliados demonstraram uma tenacidade significativa, que é a capacidade de absorver energia, representada pela área sob as curvas dos gráficos

(tensão x deformação). Também apresentou a capacidade de resistir a altas cargas no regime elástico e também, um regime plástico, indicando que o material apresenta deformações consideráveis antes da ruptura.

Os resultados de rigidez à flexão e momento máximo dos painéis sanduíche com núcleo corrugado de partículas de bagaço de cana-de-açúcar foram compilados na tabela 10 para comparação com os valores mínimos referenciados para classes de painéis OSB do documento PS-2-10 (APA The Engineered Wood Association, 2011), classificados de acordo com a aplicação e o comprimento de vão ou a espessura nominal (em polegadas).

Tabela 10 – Propriedades do painel sanduíche comparadas com propriedades de OSB estruturais

Tipo de painel ou Classe de uso		Rigidez à flexão EI (N-mm ² /mm)		Momento máximo na flexão (N-mm/mm)	
		Paralelo ao eixo forte	Perpendicular ao eixo forte	Paralelo ao eixo forte	Perpendicular ao eixo forte
Experimental	T1	7,16 x 10 ⁶	2,55 x 10 ⁶	4746	2928
	T2	1,28 x 10 ⁶	0,45 x 10 ⁶	897	488
	T3	2,86 x 10 ⁶	0,73 x 10 ⁶	1199	819
Vedação	Roof -32/subfloor-16	0,49 x 10 ⁶	0,35 x 10 ⁶	460	190
	Roof -40/subfloor-20	1,24 x 10 ⁶	0,36 x 10 ⁶	810	360
	Roof -48/subfloor-24	1,79 x 10 ⁶	0,73 x 10 ⁶	920	510
Estrutural	1/2	0,49 x 10 ⁶	0,27 x 10 ⁶	460	330
	19/32 & 5/8	1,24 x 10 ⁶	0,47 x 10 ⁶	810	500
	23/32 & 3/4	1,79 x 10 ⁶	0,71 x 10 ⁶	920	650
Piso	Single Floor – 24	1,6 x 10 ⁶	0,54 x 10 ⁶	910	320
	Single Floor – 32	4,17 x 10 ⁶	1,27 x 10 ⁶	1570	600
	Single Floor - 48	8,66 x 10 ⁶	2,11 x 10 ⁶	2080	820

*Valores obtidos do documento PS- 2-10, Tabela 8 (APA – The Engineered Wood Association, 2011).

A partir dos valores apresentados é possível notar que o tratamento T1 obteve um desempenho superior à quase todas as classes de painéis OSB para diversas utilizações, sendo que apenas o painel classificado como piso para vãos de 122 cm (48”) apresenta valores mínimos superiores ao tratamento um (longitudinal), porém aproximadamente equivalentes. Essa superioridade nas propriedades do T1 mesmo em

relação a painéis OSB se deve à densidade e também à configuração do painel que proporciona capacidade estrutural ao painel de partículas.

O tratamento T2 apresentou capacidade de atender aos valores indicados para aplicação como vedação e inclusive algumas aplicações estruturais.

O tratamento T3 atende aos valores mínimos para as três classes de aplicação, com limitação apenas para uso como piso em comprimentos de vão maiores que 61 cm (24').

4.5 Avaliação teórica do potencial de aplicação do material como componente construtivo

Devido ao formato do painel e aos resultados satisfatórios de propriedades mecânicas, optou-se em propor utilizações que contemplem a capacidade do material de resistir a altas cargas na flexão. Com o objetivo de comprovar a capacidade estrutural do material para aplicação como piso, foi feita uma simulação teórica com base em equações fornecidas pela APA - Panel Design Specification (APA The Engineered Wood Association, 2012) e limites de deflexão estabelecidos pelo International Building Code (IBC, 2012). Os resultados desta análise teórica estão apresentados na tabela 11.

Tabela 11 – Resultados da simulação teórica de aplicação dos painéis como piso

	Wb Carga uniforme admissível com base na capacidade de resistência à flexão do painel (kgf/m ²)	Wd (V) Carga acidental uniforme com base na deflexão admissível (kgf/m ²)	Wd (T) Carga total uniforme com base na deflexão admissível (kgf/m ²)
T1 (48') – 121,9 cm	2603	345	230
T2 (24') – 60,96 cm	594	564	365
T3 (24') – 60,96 cm	959	843	597
OSB 48 o.c - 121,9 cm	386	522	348

*Os valores entre parênteses representam o vão livre que foi adotado, na última linha é apresentado os valores de um painel OSB para um vão 48 polegadas.

Os valores apresentados são relativos ao eixo longitudinal ou eixo forte dos painéis. A norma NBR 6120:1980 – *Cargas para projetos estruturais* especifica valores mínimos de 150 kgf/m² para pisos de edifícios residenciais, os três tratamentos

apresentaram valores superiores ao mínimo estabelecido pela norma brasileira atendendo aos requisitos de deflexão estabelecidos pelo IBC (2012) para cargas totais. A carga admissível para que ocorra a falha na flexão é consideravelmente alta para os tratamentos T1 e T3.

Com base nestes valores é possível propor aplicações estruturais, como piso para o material avaliado neste trabalho, tendo constatado que os três tratamentos atendem aos requisitos de carga admissível (NBR 6120: 1980) e deflexão admissível (IBC, 2012) para esta aplicação.

5 CONCLUSÃO

Com base nos resultados obtidos nesse trabalho, foi possível verificar a viabilidade de produção de painéis sanduíche com núcleo corrugado de partículas de bagaço de cana-de-açúcar e resina PU- mamona. Os parâmetros de produção adotados se mostraram adequados para a fabricação em escala laboratorial, mas visando posteriormente uma produção em grande escala, o processo deve ser aprimorado para a viabilidade da produção em nível industrial.

O desenvolvimento experimental da produção deste tipo de painel em escala laboratorial pode amparar futuras pesquisas de painéis sanduíche com núcleo corrugado constituídos de variados subprodutos lignocelulósicos.

A resina PU-mamona apresentou eficácia na utilização como adesivo na fabricação dos painéis de partículas e na colagem das faces com o núcleo do painel sanduíche.

Os painéis T1 apresentaram propriedades mecânicas de força máxima, rigidez à flexão, rigidez de cisalhamento e módulo de cisalhamento superiores aos encontrados na literatura para painéis sanduíche com núcleo corrugado de partículas orientadas de madeira. Os três tratamentos podem ser indicados para aplicação como piso (de acordo com as propriedades de EI e momento máximo) segundo as classificações do documento PS-2-10 (APA The Engineered Wood Association, 2011). Por outro lado, verifica-se que o T2 e T3 suportam vãos até 61 cm e o T1 suporta até 121,9 cm que é o vão máximo indicado para painéis OSB usados como piso.

O conteúdo desta pesquisa abordou principalmente a metodologia de produção destes painéis e a viabilidade de utilização dos painéis sanduíche de bagaço-de-cana-de-açúcar na indústria da construção civil. No entanto, outras caracterizações são recomendadas antes deste tipo de material ser introduzido no mercado.

5.1 Perspectivas de continuidade

Algumas recomendações de continuidade do trabalho e investigações que podem ser realizadas:

1. Avaliação da resistência ao impacto (NBR 15575:2013).
2. Testes para avaliação da conexão lateral com elementos fixadores (ASTM D 1761:2012).
3. Avaliações sobre durabilidade (envelhecimento natural e acelerado)

4. Desenvolvimento de perfis para conexão entre painéis adjacentes.
5. Avaliação das propriedades de isolamento térmico e acústico.

6 REFERÊNCIAS

ALLEN, Howard G.. **ANALYSIS AND DESIGN OF STRUCTURAL SANDWICH PANELS**. Southampton: Pergamon Press, 1969.

AMERICAN NATIONAL STANDARDS INSTITUTE. **ANSI A208.1**: Particleboard. Gaithersburg, 1999.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM 1037-06**: Standard Test Method for Evaluating Properties of Wood-Base Fiber and Particle Panel Materials, Philadelphia 2006.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM 1530-11**: Standard Test Method for Evaluating the Resistance to Thermal Transmission of Materials by the Guarded Heat Flow Meter Technique. West Conshohocken, 2014.
_____. **ASTM D7250 / D7250M-16**: Standard Practice for Determining Sandwich Beam Flexural and Shear Stiffness, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2016.

_____. **ASTM C 393 / C393M-11**: Standard Test Method for Core Shear Properties of Sandwich Constructions by Beam Flexure. West Conshohocken, 2003.

_____. **ASTM D 7249/ D7249M-06**: Standard Test Method for Facing Properties of Sandwich Constructions by Long Beam Flexure. West Conshohocken, 2006.

APA - The Engineered Wood Association. **PS 2-10**: Performance Standard for Wood-Based Structural-Use Panels. Tacoma, WA, USA, 2011.

APA - The Engineered Wood Association. **Panel Design Specifications**. Tacoma, WA, USA, 2012.

ARAUJO, L.C.R. **Caracterização química e mecânica de poliuretanas elastoméricas baseadas em materiais oleoquímicos**. 1992. Dissertação (Mestrado) – Curso de Física e Química, Departamento de Física e Química de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1992.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14810-3**: Chapas de madeira aglomerada. Rio de Janeiro, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15220**: Desempenho térmico de edificações. Rio de Janeiro, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15575-4**: Edificações Habitacionais – Desempenho: Requisitos para os sistemas de vedações verticais internas e externas – SVVIE. Rio de Janeiro, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6120**: *Cargas para o cálculo de estruturas de edificações*. Rio de Janeiro, 1980.

BARROS FILHO, R.M. **Painéis aglomerados a base de bagaço de cana-de-açúcar e resinas ureia-formaldeído e Melamina formaldeído.** 2009. 99f. Dissertação (Mestrado) – Curso de Engenharia de Materiais – Processos de Fabricação, Departamento de Engenharia de Materiais, Rede Temática em Engenharia de Materiais, Ouro Preto, 2009.

BARROS, N.G. **Estudo da durabilidade de painéis de partículas de bagaço de cana-de-açúcar e resina poliuretana a base de óleo de mamona para aplicação na construção civil.** 2009. 99f. Tese (Doutorado) – Faculdade de Zoot. e Engenharia de Alimentos, Universidade de São Paulo, Pirassununga, 2015

BATTISTELLE, R. A. G.; MARCILIO, C.; LAHR, F. A. R. Emprego do bagaço da cana-de-açúcar (*Saccharum officinarum*) e das folhas caulinares do bambu da espécie *Dendrocalamus giganteus* na produção de chapas de partículas. **Minerva**, São Carlos, v. 5, n. 3, p. 297–305, 2009.

BERTOLINI, M.S. **Emprego de resíduos de *Pinus sp* tratado com preservante CCB na produção de chapas de partículas homogêneas utilizando resina poliuretana à base de mamona.** 2011. 129f. Dissertação (Mestrado) – Curso em Engenharia e Ciência de Materiais, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2011.

BUENO, Stephen B. **Chapas de partículas multicamadas com resíduos lignocelulósicos e resina PU de mamona.** 2015. 91 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia e Ciência de Materiais, Universidade de São Paulo Faculdade de Zoot. e Eng. de Alimentos, Pirassununga, 2015.

CABRAL, Matheus Roberto. **Painéis de partículas homogêneas cimento-bagaço de cana-de-açúcar curados por carbonatação acelerada.** 2016. 90 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia e Ciência de Materias, Programa de Pós-graduação em Engenharia e Ciências de Materiais, Universidade de São Paulo Faculdade de Zoot. e Eng. de Alimentos, Pirassununga, 2016.

CAMPOS, C.I **Propriedades físico-mecânicas de MDF produzido com fibras de madeira de reflorestamento e adesivos alternativos em diferentes teores.** 2005. 113f. Tese (Doutorado) – Curso de Engenharia de Materiais, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005.

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

CARLSSON, L., & KARDOMATEAS, G. (2011). **Structural and Failure Mechanics of Sandwich Composites.** USA. Springer.

CARNEIRO, A.C.O et al. Propriedades de chapas de flocos fabricadas com adesivo ureia-formaldeído e de taninos da casca de *Eucalyptus grandis* W.Hill ex Maiden ou de *Eucalyptus pellita* F. Muell. **Revista Árvore**, Viçosa-MG, v. 28, n. 5, p.715-724, 2004.

CARVALHO, S.T.M. **Propriedades térmicas do painel aglomerado de bagaço de cana de açúcar.** 2010. 74f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Lavras.(UFLA) Lavras, 2012.

CHAMMA, P.V.C, **Produção de painéis a partir de resíduos sólidos para uso como elemento arquitetônico.** Tese (Doutorado) – Curso em Agronomia, Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Botucatu, 2004.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO - CONAB. **A geração termoeletrica com a queima do bagaço de cana-de-açúcar no Brasil,** Brasília: CONAB, 2011.

DALEN, H. Utilization of bagasse as raw material for particleboard production in the future. In: **Proceedings of the TAPPI pulping conference**; 1980; Atlanta, GA.

DAVIES, J. (2001). **Lightweight Sandwich Construction.** Malden, MA: Blackwell Science, Oxford.

DIAS, F.M. **Aplicação de resina poliuretana à base de mamona na fabricação de painéis de madeira compensada e aglomerada.** 2005. 151f. Tese (Doutorado) – Curso de Física e Química, Departamento de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2005.

FIORELLI, Juliano et al. Painéis de partículas à base de bagaço de cana e resina de mamona – produção e propriedades. **Acta Scientiarum. Technology**, Maringá, v. 33, p.401-406, 2005.

FIORELLI, Juliano et al. Sugarcane bagasse and castor oil polyurethane adhesive-based particulate composite. **Mat. Research.**, v. 16, n. 2, p.439-446, abr. 2013.

FIORELLI, Juliano et al. Painéis de partículas à base de bagaço de cana e resina de mamona – produção e propriedades. **Acta Scientiarum. Technology**, Maringá, p.401-406, 2011.

FIORELLI, J. **Desenvolvimento, produção e caracterização de painéis de partículas lignocelulósicas e resíduos agroindustriais.** 2013. 161f. Tese (Livre Docência), Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos, Universidade de São Paulo, Pirassununga, 2013.

GAGLIARDO, Debora Pierini; MASCIA, Nilson Tadeu. Análise de estruturas sanduíche: parâmetros de projeto. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, p.247-258, 2010.

GOUVEIA, Fernando Nunes. **Produção de Chapas de Partículas Orientadas (OSB) a Partir das Espécies Eucalyptus grandis W. HILL EX MAIDEN E Pinus elliottii ENGELM.** 2001. 68 f. Tese (Doutorado) - Curso de Ciência Florestal, Programa de Pós-graduação em Ciência Florestal., Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2001.

HELLER, W. The manufacture of particleboard from nonconventional raw materials. **Holz als Roh- und Werkstoff**. p. 393-396, 1980.

HESCH, R. Início da indústria integralizada de placas aglomeradas de bagaço no Paquistão. **Brasil açucareiro**, v.75, n.2, p.33-50, 1970.

HUNT, J. & WINANDY, J. E. 3D Engineered Fiberboard: Engineering Analysis of a New Building Product. Proceedings Paper 8.02 (pp. 1–8). **EcoComp** 2003. Queen Mary, University of London.

HUNT, J. 3D Engineered Fiberboard: Finite Element Analysis of a New Building Product. International **ANYSY Conference** 2004. Pittsburg, PA.

International Code Council. **International Building Code**. Country Club Hills, IL: International Code Council, 2012.

IWAKIRI, S.; ALBUQUERQUE, C. E. C.; MENDES, L. M.; LATORRACA, J. V. F. Painéis de madeira aglomerada. In: **Painéis de madeira reconstituída**. 1. ed. Curitiba: FUPEF, 2005. Cap. 4.

IWAKIRI, S.; SHIMIZU, J.; SILVA, J. C.; MENESSI, C. H. S. D.; PUEHRINGHER, A.; VENSON, I. & LARROCA, C. Produção de painéis de madeira aglomerada de *Grevillea robusta* A. Cunn. ex R. Br. **Revista Árvore**, 2004. v.28, p.883-887

JOSÉ, F.J.; BERALDO, A.L. Chapas prensadas de partículas de bambu e adesivo poliuretano à base de óleo de mamona. In: EMBRAMEM – Encontro Brasileiro em Madeiras e em estruturas de Madeira, 10., 2006, São Pedro – SP. **Anais...** Botucatu: UNESP, 2006 v.1 p.1-11.

KATSUKAKE, A. **Uma revisão SOBRE resina Uréia-Formaldeído (R-UF) empregada na produção de Painéis de Madeira Reconstituída**. 2009. 61F. Monografia de Conclusão de Curso – UNESP – FC, Bauru

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

MALONEY, T. M. The family of wood composite materials. **Forest Products Journal**, v. 46, n. 2, p. 19-26, 1996.

MARRA, Alan A. **Technology of wood bonding: Principles in practice**. New York: Springer, 1992.

MENDES, L. M.; ALBUQUERQUE, C. E. C. & IWAKIRI, S. - **Revista da Madeira Wood Magazine**, Edição Especial “Painéis”, p.12 (2003).

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

MIRANDA, José Roberto. **História da Cana-de-açúcar**. São Paulo: Komedi, 2008. 342 p.

MOSLEMI, A.A. **Particleboard: Materials**. Illinois: Southern Illinois University Press, 1974. v.1. 244p.

MOSLEMI, A. A.; PFISTER, S. C. The influence of cement/wood ratio and cement type on bending strength a dimensional stability of wood-cement composite panels. **Wood and Fiber Science**, v. 19, n. 2, p. 165-175, abr. 1987.

OLIVEIRA, C. Mercado e potencial de biomassa para energia. **Revista da madeira**. 133 ed. Dez. 2012.

OLMOS, M.A.C **Equipamento e processo de fabricação de chapas de madeira aglomeradas a partir de resíduos de madeira**. 1992.110 f. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1992.

PIERRE, F. C. **Caracterização físico-mecânica de painéis aglomerados de Eucalyptus grandis COM adição de resíduos industriais madeireiros**. Botucatu:UNESP, 2010, 122p. (Tese Doutorado, Faculdade de Ciências Agrônômicas da UNESP)

SALTHAMMER, T. The formaldehyde dilemma. **International Journal of Hygiene and Environmental Health**, Muenchen, v. 218, n.4, p.433-436. 2015.

SARTORI, D. L. et al. Paineis em madeira de reflorestamento e chapas de partículas para instalações rurais. **Floresta Ambiente**, Curitiba, v. 19, n. 2, p. 171-178, 2012

SARTORI, D.L. **Painel modular de chapas de partículas de bagaço de cana para fechamento lateral de instalação para bovinos**, 2015. Tese (Doutorado) – Faculdade de Zoot. e Engenharia de Alimentos, Universidade de São Paulo, Pirassununga, 2015

TEIXEIRA, D.E; COSTA, F.; SANTANA, M.A.E Aglomerados de bagaço de cana-de-açúcar: resistência natural ao ataque de fungos. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, n.5, p.29-34, 1997.

TORRES, Nádia Hortense et al. INDÚSTRIA SUCROALCOOLEIRA: GESTÃO DE SUBPRODUTOS. **Revista de Ciências Agro-ambientais**, Alta Floresta-MT, v. 10, p.225-236, 2012.

VILAR, W.D. **Química e tecnologia dos poliuretanos**. [S.I]: Grupo Pronor. 1993.

VOTH, C. **Lightweight sandwich panels using small diameter timber wood-strands and recycled newsprint cores**. M.S. Thesis, Dept. of Civil and Env. Engr., Washington State University, Pullman, WA, 2009.

WAY, Daniel. **Proof of Concept for a Three-Dimensional Molded Core Wood-Strand Sandwich Panel**. 2015. 123 f. Dissertação (Mestrado) - Wood Science, Oregon State University, Oregon, 2015.

WAY, Daniel et al. Evaluation of a Wood-Strand Molded Core Sandwich Panel. **Journal Of Materials In Civil Engineering**, [s.l.], v. 28, n. 9, p.040160741-040160749, set. 2016. American Society of Civil Engineers (ASCE).

WITHE, N. et al. Wood-Strand sandwich panels for panelized construction. In: FIRST INTERNACIONAL CONFERENCE ON BIO-BASED BUILDING MATERIALS. p. 695-697, France, 2015. **Anais...**

UNIÃO DA INDÚSTRIA DE CANA DE AÇÚCAR. **Histórico do setor**. Disponível em: <http://unica.com.br/linhadotempo/index.html>. Acesso em: 10 de dez. 2016.