UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS

JULIANA ARGENTE CAETANO

Desenvolvimento e caracterização de compósitos produzidos a partir da reciclagem dos resíduos de café para uso na construção civil

São Carlos

2021

JULIANA ARGENTE CAETANO

Desenvolvimento e caracterização de compósitos produzidos a partir da reciclagem dos resíduos de café para uso na construção civil

Tese apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo como parte dos requisitos para obtenção do título de Doutora em Ciências: Engenharia Hidráulica e Saneamento.

Orientador: Professor Associado Valdir Schalch
Co-orientador: Prof. Dr. Javier Mazariegos Pablos

VERSÃO CORRIGIDA

São Carlos- SP

2021

AUTORIZO A REPRODUÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO, POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Prof. Dr. Sérgio Rodrigues Fontes da EESC/USP com os dados inseridos pelo(a) autor(a).

C127d

Caetano, Juliana
Desenvolvimento e caracterização de compósitos produzidos a partir da reciclagem dos resíduos de café para uso na construção civil / Juliana Caetano; orientador Valdir Schalch; coorientador Javier Pablos. São Carlos, 2021.

Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Hidráulica e Saneamento e Área de Concentração em Hidráulica e Saneamento -- Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2021.

1. Resíduos de café. 2. Materiais compósitos. 3. Resíduos agrossilvopastoris. 4. Construção civil. 5. Painíes de partículas. I. Título.

Eduardo Graziosi Silva - CRB - 8/8907

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidata: Engenheira **JULIANA ARGENTE CAETANO.**

Título da tese: "Desenvolvimento e caracterização de compósitos produzidos a partir da reciclagem dos resíduos de café para uso na construção civil".

Data da defesa: 05/03/2021.

Comissão Julgadora	Resultado
Prof. Associado **Valdir Schalch** **(Orientador)** (Escola de Engenharia de São Carlos/EESC-USP)	APROVADA
Prof. Titular **Francisco Antonio Rocco Lahr** (Escola de Engenharia de São Carlos/EESC-USP)	APROVADA
Dra. **Maria Fátima do Nascimento** (Pós Doutoranda/LAMEM-USP)	APROVADA
Prof. Dr. **Rodrigo Eduardo Córdoba** (Universidade Federal de São Carlos/UFSCar)	APROVADA
Prof. Titular **Holmer Savastano Junior** (Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos/FZEA-USP)	APROVADA

Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Hidráulica e Saneamento:
Prof. Dr. **Eduardo Mario Mendiondo**

Presidente da Comissão de Pós-Graduação:
Prof. Titular **Murilo Araujo Romero**

Para Sandra Fátima Argente

"Alguém prevenia, filho é pro mundo!

_Não, o meu é meu

Em tudo eu via a voz de minha mãe"

AGRADECIMENTOS

“Profundo ver o peso do mundo nas costas de uma mulher...” Minha mãe como professora sempre dizia que não poderíamos escolher essa profissão tão desvalorizada, acontece que para mim, o seu exemplo foi tão maior que suas palavras...Mamãe, agradeço pela força, cuidado, amor e por ter feito de tudo para que pudéssemos ter a oportunidade, através da educação, de sermos livres. E, assim, escolhi a USP como instituição de pesquisa e ensino para prosseguir com os meus estudos e minha vida profissional, um lugar que me impressionou desde o primeiro dia em que me deparei com o que que vi. Primeiro foi o espaço físico, como pode ter um prédio de laboratórios para cada área da química ou da física? Com o tempo fui percebendo que os prédios não eram nada perto do valor das pessoas que construíam essa universidade todos os dias. Não sei se foi sorte, ou se os bons realmente são a maioria, mas tive a oportunidade de conhecer grandes professores/pesquisadores, que se tornaram grandes amigos e também grandes exemplos. É perto dos bons que a gente fica melhor, não é? Em meio as dificuldades intrínsecas a vida acadêmica e a intensa desvalorização desses últimos anos, mesmo após seis anos de USP, ainda me impressiono com o que vejo. Sempre vou agradecer por ter visto e vivenciado de perto como uma educação de qualidade muda tudo.

Agradeço ao meu pai pelo constante apoio e também à minha irmã e ao meu irmão, dois super-heróis.

Meus agradecimentos a minha avó e ao meu avô (*in memoriam*) pelo carinho e por sempre se preocuparem com o meu bem-estar. Você está comendo direito? Quer que eu faça um cafezinho para você estudar? Quando você acabar isso que você está fazendo, você vai voltar para cá, não vai?

Ao Gabriel, Paula, Mariana e Vanessa agradeço pelo companheirismo desde os anos de escola. Se não fosse a Vanessa e os seus livros emprestados para o processo seletivo de mestrado, não teria conhecido o SHS.A Mariana agradeço pelas revisões de inglês nos artigos, o Gabriel por ter sido a mão talentosa no vídeo do concurso Prêmio Vídeo Pós-graduação e a Paula pelo seu apoio incondicional e palavras certeiras. Estendo esse agradecimento a Jéssica, que apesar de também ser minha conterrânea, conheci durante seu mestrado em São Carlos e suas palavras de incentivo também foram fundamentais.

Gui, Ro, Ina, Ale, Rá, Wesley, Cebola, Carol, Uli, May, Carol Ferreira, Tainá, Moarinha, Say, Ju, Ju Pessin e Ju Silva, como explicar esse nosso encontro? Meus eternos agradecimentos

por terem sido minha família em São Carlos e minha eterna saudade também. Coração agora espalhado pelo Brasil inteiro e pela Colômbia.

Ao Prof. Valdir, agradeço muito por ter me dado essa oportunidade, pelo seu acolhimento durante esses seis anos, pela sua confiança e respeito, você me abriu um novo mundo. Meus profundos agradecimentos também ao Prof. Javier e ao Prof. Rocco, essa tese seria impossível de ser sido construída sem o apoio de vocês, nunca vou esquecer a generosidade e os ensinamentos, assim como não esquecerei o apoio da Ale e da Carol Bianco, do Prof. Claudio Cardoso e do Prof. Edenir, também essenciais para a conclusão desse trabalho.

À Fatí, Cidão (*in memoriam*), Braga, Jaime, Tiago, Rodrigo e Bárbara do Laboratório de Madeiras e Estruturas de Madeira – LAMEM, por terem me auxiliado nos experimentos.

Ao Victor, Sérgio, Célio, Eduvaldo e Tico do Instituto de Arquitetura e Urbanismo-IAU pela disposição em ajudar nos procedimentos dos ensaios laboratoriais. Em especial ao Paulo, pela companhia e auxilio nos testes das pesquisas desde o segundo ano de mestrado.

À todos os integrantes que passaram pelo Núcleo de Estudo e Pesquisa em Resíduos Sólidos- NEPER, pois foi esse grupo o responsável pela minha formação e meu desenvolvimento como profissional na área de resíduos sólidos. Em especial ao Rodrigo, Marco, Paula, Flávio, Amanda, Carol Bianco, Victor, Carol Palamin, Laura, Gabi, Vivi, Isa, André, Túlio, Jonatas, Júlia, Fernanda, Victor, Ana Maria, Ana Paula, Gabriela Oviedo e Hylma.

A Sá, a Rose e a Priscilla por sempre resolverem com disposição os nossos pepinos acadêmicos, assim como a Fernanda.

À Luiza que desde a minha graduação é minha grande torcedora e incentivadora, além disso, me deu de presente meu afilhado Gabriel, que assim como meus sobrinhos Lavínia e Benício nos permite ter a esperança de um mundo melhor.

Ao Júlio e as meninas do Laboratório de Saneamento pelo auxilio nos testes de lixiviação e solubilização.

Por fim, meus agradecimentos à Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos, Instituto de Arquitetura e Urbanismo, Laboratório de Madeira e Estruturas em Madeiras, ao Instituto de Física de São Carlos, ao Instituto de Química da Universidade de São Paulo, ao Laboratório de Saneamento, ao Laboratório de Acústica Aplicada da UFSCAR e a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES).

“Por vezes sentimos que aquilo que fazemos não é senão uma gota de água no mar, mas o mar seria menor se lhe faltasse uma gota ”

RESUMO

CAETANO, A.J. **Desenvolvimento e caracterização de compósitos produzidos a partir da reciclagem dos resíduos de café para uso na construção civil**. 2021.Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos,2021.

Os resíduos agrossilvopastoris, se dispostos de maneira inadequada, são fontes de impactos ao meio ambiente por meio da adição excessiva de matéria orgânica no solo e na água e, se queimados, geram gases poluentes que intensificam o efeito estufa. O Brasil é o maior produtor e exportador de café e o maior consumidor do produto no mundo, como consequência, a geração de resíduos sólidos do beneficiamento do café no país é bastante significativa. Estima-se uma geração de aproximadamente 4 milhões de toneladas de resíduos do café no Brasil em 2020. Por isso, esse trabalho teve como objetivo o desenvolvimento de um material compósito, na forma de painel de partículas aglomeradas, utilizando o resíduo agrossilvopastoril casca de café e a resina poliuretana de óleo de mamona para sua utilização na construção civil. Esse material compósito pode agregar valor econômico ao resíduo, evitar disposições inadequadas e atender à crescente demanda da indústria de painéis de madeira. Foram confeccionados compósitos com cascas de café provenientes dos processos de beneficiamento do fruto cafeeiro por via seca e por via úmida, com a adição das fibras vegetais de juta, coco e sisal. Os compósitos foram caracterizados com relação as suas propriedades mecânicas na flexão estática e físicas de granulometria e umidade. A composição com a fibra de sisal se mostrou mais adequada para a produção do compósito. Dessa forma, foi realizado um estudo com novas composições através de um planejamento fatorial com diferentes composições de resina, presença ou ausência de fibras de sisal, casca de café obtida pela via seca e diferentes parâmetros de produção: temperatura e pressão. As propriedades aferidas nessa etapa foram de adesão interna, módulo de elasticidade e módulo de ruptura na flexão estática, absorção de água, inchamento em espessura e densidade aparente. Suas propriedades térmicas e acústicas também foram aferidas e foi obtido o coeficiente de absorção sonora e a condutividade térmica desses novos painéis produzidos. Os resultados experimentais obtidos foram promissores e o compósito demonstrou potencial de aplicação na construção civil para ser utilizado como móveis, forros, divisórias, placas termo acústicas e elemento de vedação não estrutural para ambientes internos. Ademais, com o intuito de determinar os efeitos ambientais causados pelos resíduos gerados no processamento dos grãos de café, esse trabalho também teve como objetivo a classificação dos resíduos sólidos gerados nos cultivos cafeeiros pela normalização brasileira, que os classifica em perigosos ou não perigosos e ainda os resíduos não perigosos são classificados em não inertes ou em inertes. Como resultado, os resíduos sólidos receberam a classificação II-A, não-perigoso e não-inerte.

Palavras-chave: Resíduos agrossilvopastoris; Resíduos de café; Painéis de partículas; Materiais compósitos; Construção civil.

ABSTRACT

CAETANO, A.J. **Development and characterization of composites produced from coffee residues recycling for its use in civil construction**. 2021. Thesis (Doctorate) – São Carlos School of Engineering, University of São Paulo, São Carlos, 2021.

Agricultural waste if inappropriately disposed is a source of environment impacts through the excessive addition of organic matter in the soil, water and if burned generate polluting gases that intensify the greenhouse effect. Brazil is the largest coffe producer and exporter and the largest consumer of the product, as a consequence, the generation of this solid residues in the country is quite significant. It is estimated that approximately 4 million tonnes of coffee waste were generated in Brazil in 2020. Therefore, this work aimed to develop a composite material, in the form of agglomerated particle board, using the agricultural coffee husk residue and castor oil – based polyurethane adhesive for it use in civil construction. This composite material can add economic value to the waste, avoid inappropriate destinations and respond to the growing demand of the wood panel industry.Composites were made with coffee husks from two different processes: dry and wet, with the addition of vegetable fibers such as jute, coconut and sisal. The composites were characterized according to their mechanical properties: Modulus of Rupture (MOR) and Modulus of Elasticity (MOE) and physical : particle size analysis and humidity. The composition with sisal fiber proved to be more suitable for the production of the composite. For this reason, a study with new compositions was carried out through a factorial design with different resin compositions, presence or absence of sisal fibers, coffee husks obtained through the dry process and different production parameters: temperature and pressure.In this step, the properties measured were internal bond, MOE and MOR, water absorption, thickness swelling and apparent density. Its thermal and acoustic properties were also assessed.The sound absorption coefficient and thermal conductivity were obtained. The experimental results were promising and the composite showed potential for its use in the civil construction industry to be used as and non-structural element for indoor environments, furniture, partitions and as insulating and acoustic panels.In addition, in order to determine the environmental effects caused by the residues , this work also aimed classifying the solid residues by Brazilian standardization, which are classified as hazardous or non-hazardous; and non-hazardous waste is classified as non-inert or inert. As a result, solid waste was classified as II-A, non-hazardous and non-inert.

Keywords: Agricutural waste; Coffee residues; Particle boards; Composite materials; Construction Industry**.**

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1– Produção mundial de café no ano cafeeiro de 2018/2019 28
Figura 2– Etapas da limpeza do grão de café e separação do café boia 29
Figura 3– Morfologia do grão de café 29
Figura 4– Etapa de secagem do grão 30
Figura 5– Etapas de despolpamento e desmucilagem....30
Figura 6 – Processo de beneficiamento do café por via seca e por via úmida 31
Figura 7– Geração de resíduos da agroindústria do café no ano base de 2009 por estado brasileiro..33
Figura 8 - Subprodutos da indústria do café 34
Figura 9 – Casca de café utilizada como combustível 42
Figura 10– Secagem em altas temperaturas e falta de controle ambiental 42
Figura 11 – Cinzas da casca de café 43
Figura 12 – Disposição inapropriada das cinzas 43
Figura 13– Síntese da Poliuretana 46
Figura 14 – Síntese da Uretana....47
Figura 15 – Ácido ricinoléico e seus grupos reativos 47
Figura 16– Transesterificação do óleo mamona com glicerina 48
Figura 17– Difenilmetado di-isocianto....48
Figura 18– Seguimento rígido e flexível da Poliuretana....49
Figura 19 – Crosslinking entre os grupos rígidos da Poliurenata....49
Figura 20– Estrutura reticulada da poliuretana....49
Figura 21– Método do pré-polímero 50
Figura 22- Casca de café obtida por via úmida....60
Figura 23- Casca de café obtida por via seca....60
Figura 24– Resina Poliuretana 61
Figura 25 – Fibras vegetais moídas 61
Figura 26– Processo de produção das placas 62
Figura 27– Fibra de sisal – tamanho aproximado de 5cm....68
Figura 28– Ensaio de flexão estática 74
Figura 29 –MOR via úmida 80
Figura 30– MOE via úmida 81
Figura 31 – MOR via seca 82
Figura 32– MOE via seca 82
Figura 33- MOR....83
Figura 34 – MOE 84
Figura 35 – Ensaio de tração perpendicular 85
Figura 36– Imersão dos corpos de provas em água por 24h 86
Figura 37 – Tipologias confeccionadas 88
Figura 38 – Resultados para o MOR: Box-Plot e Médias (MPa) 90
Figura 39- Resultado da influência dos parâmetros operacionais no MOR 91
Figura 40– Gráfico de probabilidade....91
Figura 41-Resultados para o MOE: Box-Plot e Médias (MPa) 93
Figura 42-Resultado da influência dos parâmetros operacionais no MOE 94
Figura 43- Gráfico de probabilidade 95
Figura 44- Resultados no ensaio de Tração Perpendicular: Box-Plot e Médias (MPa) 96

Figura 45- Resultado da influência dos parâmetros operacionais na adesão interna.....97
Figura 46- Gráfico de Probabilidade 97
Figura 47- Resultado da influência dos parâmetros operacionais no Inchamento em espessura (24h) 99
Figura 48– Resultados para absorção de água em porcentagem (%).....100
Figura 49 – Resultados para a densidade aparente dos compósitos (g/cm^3) 101
Figura 50– Esquema do Método do Fio a Quente Paralelo 105
Figura 51 – Amostras utilizadas para a obtenção dos coeficientes de absorção sonora 107
Figura 52– Resultados para as faixas de frequência na banda de um terço de oitava.....108
Figura 53– Resultados obtidos por novas amostras da tipologia T7 108
Figura 54 – Resultados obtidos por novas amostras da tipologia T5 109
Figura 55 – Equipamento para a extração do líquido lixiviado 112
Figura 56 – Etapas de Filtração: 1- filtração em filtro de café do solubilizado da casca de café obtida pela via úmida; 2 – filtração em papel filtro do solubilizado da casca de café obtida pela via seca ...113

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Geração de resíduos na agroindústria para as principais culturas brasileiras por região e em todo território nacional 32
Tabela 2– Comparação entre painéis MDF de bagaço de cana de açúcar e resinas UF e PU 54
Tabela 3– Características das fibras de juta, sisal, coco e casca de café....56
Tabela 4– Composição das chapas de partículas....63
Tabela 5– Composição das novas tipologias das chapas de partículas....67
Tabela 6– Granulometria da casca de café por via seca 76
Tabela 7– Granulometria da casca de café por via úmida 76
Tabela 8– Granulometria da fibra de coco....77
Tabela 9– Granulometria da fibra de juta 77
Tabela 10– Granulometria da fibra de sisal....78
Tabela 11- Teor de Umidade das placas....79
Tabela 12 – Valores médio de MOR e MOE para as chapas de via úmida....79
Tabela 13– Valores médio de MOR e MOE para as chapas de via seca....81
Tabela 14- Combinações de variáveis usadas na fabricação dos compósitos....87
Tabela 15 – Coeficientes de absorção sonora para bandas de 1/3 de oitava 106
Tabela 16 – Coeficientes de absorção sonora para bandas de oitava 106
Tabela 17 – Condutividade térmica das tipologias produzidas 110
Tabela 18– Resultados dos compostos **inorgânicos** presentes no extrato **solubilizado** da casca de café obtida por **via úmida** 115
Tabela 19– Resultados dos compostos **inorgânicos** presentes no extrato **solubilizado** da casca de café obtida por **via seca** e do **compósito produzido** 115
Tabela 20– Resultados dos compostos **inorgânicos** presentes no extrato **lixiviado** da casca de café obtida por **via úmida** 116
Tabela 21– Resultados dos compostos **inorgânicos** presentes no extrato **lixiviado** da casca de café obtida por **via seca**....116
Tabela 22 – Resultados dos compostos **orgânicos** presentes no extrato **lixiviado** da casca de café obtida por **via úmida** 117
Tabela 23 – Resultados dos compostos **orgânicos** presentes no extrato **lixiviado** da casca de café obtida por **via seca**....118
Tabela 24– Resultados dos compostos **orgânicos** presentes no extrato **solubilizado** da casca de café obtida por **via úmida** 119
Tabela 25 – Resultados dos compostos **orgânicos** presentes no extrato **solubilizado** da casca de café obtida por **via seca**....119
Tabela 26 – Compostos com concentrações acima dos limites estabelecidos pela NBR 10004 (2004) 121

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO 23
2. OBJETIVO 24
2.1 OBJETIVO GERAL 24
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS 24
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA 26
3.1 RESÍDUOS SÓLIDOS 26
3.2 CULTIVO CAFEEIRO 27
3.3 RESÍDUOS DE CAFÉ 32
3.4 IMPACTOS GERADOS PELOS RESÍDUOS ORGÂNICOS ASSOCIADOS À AGRICULTURA 37
3.5 RECUPERAÇÃO DOS RESÍDUOS AGRÍCOLAS 37
3.6 PAINÉIS DE PARTÍCULAS AGLOMERADAS 45
3.7 MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO NÃO CONVENCIONAIS CONFECCIONADOS COM RESÍDUOS SÓLIDOS 57
4. MATERIAIS E MÉTODOS 60
4.1 MATERIAIS 60
4.2 MÉTODOS 62
5. RESULTADOS 69
5.1 CAPÍTULO 1- Avaliação física e mecânica dos painéis produzidos 69
5.2 CAPÍTULO 2: Caracterização Acústica e Térmica dos compósitos produzidos com a casca de café obtida pela via seca. 102
5.4 CAPÍTULO 3: Classificação dos resíduos sólidos gerados nas lavouras cafeeiras: casca de via úmida e casca de via seca. 111
6. CONCLUSÕES 125
6.1 Capítulo 1 - Avaliação física e mecânica dos painéis produzidos 125

6.2 Capítulo 2 - Caracterização Acústica e Térmica dos compósitos produzidos com a casca de café obtida pela via seca 126

6.3 Capítulo 3 - Classificação dos resíduos sólidos gerados nas lavouras cafeeiras: casca de via úmida e casca de via seca 127

6.4 Conclusões e considerações finais 127

7. REFERÊNCIAS 130

1. INTRODUÇÃO

A indústria da construção civil é uma das maiores responsáveis pela exploração de recursos naturais, dessa forma, o desenvolvimento de tecnologias que faça uso de resíduos sólidos é um tema relevante, que reduz a extração de recursos naturais, promove a reciclagem e impede a destinação inadequada dos resíduos.

A Política Nacional de Resíduos Sólidos, instituída pela Lei Federal nº 12305/2010 e regulamentada pelo Decreto nº 7404/2010, estabeleceu como um de seus princípios fazer com que aconteça o reconhecimento do resíduo sólido reutilizável e reciclável como um bem econômico e de valor social, gerador de trabalho e renda e promotor da cidadania (Lei no 12305, 2010. Inciso II, Art. 6o, parágrafo VII).

Nesse contexto, a Política Nacional de Resíduos Sólidos estipulou a diferença entre resíduo e rejeito: resíduos devem ser reaproveitados e reciclados e apenas os rejeitos devem ter disposição final, ou seja, a política é marcada pelo entendimento que os resíduos sólidos se constituem em recursos.

O Brasil é o maior produtor e exportador de café e o segundo maior consumidor do produto no mundo. Segundo o levantamento de janeiro de 2020, da Companhia Nacional de Abastecimento (Conab), a estimativa da safra brasileira de café, para esse ano, foi de aproximadamente 60 milhões de sacas de 60 kg de café beneficiado. Estima-se, dessa maneira, uma geração de 4 milhões de toneladas de resíduos de café.

No lugar de se constituírem como uma fonte de poluição, se dispostos de maneira inadequada, esses resíduos podem se tornar uma fonte rica de materiais lignocelulósicos. Dessa forma, passariam a ser um importante recurso na geração de diferentes produtos, como é o caso dos painéis de partículas.

A produção de painéis de partículas com resíduos sólidos agrícolas se torna uma alternativa para a diminuição da utilização da madeira, além de agregar valor econômico aos resíduos, atender à crescente demanda da indústria de painéis de madeira e, também, soma-se o fato que o crescimento da madeira pode levar anos, enquanto que os cultivos agrícolas são em sua maioria anuais e as culturas se desenvolvem rapidamente.

Quanto ao uso da casca de café, foram encontrados apenas quatro estudos anteriores que avaliaram a adição desse resíduo em painéis de partículas. Esse fato evidencia a necessidade de mais pesquisas sobre o tema para a produção de painéis com melhores propriedades ou com condições de fabricação mais otimizadas.

Isso posto, o objetivo desse trabalho é o desenvolvimento de um material compósito, na forma de painel de partículas aglomeradas, utilizando o resíduo agrossilvopastoril casca de café e a resina poliuretana de óleo de mamona para sua utilização na construção civil.

A ideia de produção de painéis de partículas engenheirados com os resíduos do beneficiamento do café é em decorrência da busca por desenvolvimento de materiais ambientalmente adequados. Variando os parâmetros, as composições de processo e os agentes de ligação (adesivos), uma vasta gama de compósitos com resíduos agrícolas pode ser produzida, substituindo a madeira em diferentes situações (BEKALO; REINHARDT, 2010).

O trabalho foi dividido em Objetivos, Revisão Bibliográfica, Materiais e Métodos, Resultados e Conclusões, porém, dentro dos Resultados foi discutido em forma de capítulos aspectos mais específicos de cada procedimento experimental.

2. OBJETIVO

2.1 OBJETIVO GERAL

O objetivo do presente trabalho é o desenvolvimento de um material compósito, na forma de painel de partículas aglomeradas, utilizando o resíduo agrossilvopastoril casca de café e a resina poliuretana de óleo de mamona para sua utilização na construção civil.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

2.2.1 Capítulo 1: Parte 1

-Avaliar a adequação das propriedades mecânicas dos painéis produzidos à norma brasileira ABNT NBR 14810-2 (2013) - Painéis de partículas de média densidade (Parte 2: Requisitos e métodos de ensaio): Módulo de Ruptura na flexão estática (MOR) e Módulo de Elasticidade na flexão estática (MOE);

-Avaliar a influência do tipo de beneficiamento do grão de café (via seca ou via úmida) nas propriedades mecânicas dos painéis produzidos: Módulo de Ruptura na flexão estática (MOR) e Módulo de Elasticidade na flexão estática (MOE);

-Avaliar a influência do tipo de fibra vegetal utilizada (juta, sisal, coco) nas propriedades mecânicas dos painéis produzidos: Módulo de Ruptura na flexão estática (MOR) e Módulo de Elasticidade na flexão estática (MOE)

-Avaliar a granulometria dos resíduos e das fibras após o processamento para sua utilização como matéria prima para a confecção dos compósitos: casca de café obtida pela via úmida, casca de café obtida pela via seca, fibras de juta, coco e sisal.

-Avaliar o teor de umidade dos painéis produzidos;

2.2.2 Capítulo 1: Parte 2

-Avaliar os efeitos das variáveis de produção (pressão, temperatura, composição da resina, presença de fibra de sisal) nas propriedades mecânicas dos compósitos produzidos com a casca de café obtida pela via seca e fibras de sisal: Módulo de Ruptura na flexão estática (MOR), Módulo de Elasticidade na flexão estática (MOE), Adesão Interna;

-Avaliar os efeitos das variáveis de produção (pressão, temperatura, composição da resina, presença de fibra de sisal) na propriedade física de inchamento em espessura dos compósitos produzidos com a casca de café obtida pela via seca e fibras de sisal.

-Determinar a densidade aparente dos compósitos produzidos e o índice de absorção de água.

-Avaliar a adequação dessas propriedades mecânicas e físicas à norma brasileira ABNT NBR 14810-2 (2013) - Painéis de partículas de média densidade (Parte 2: Requisitos e métodos de ensaio);

2.2.3 Capítulo 2

-Caracterizar a propriedade Acústica: coeficiente de absorção sonora dos compósitos produzidos com a casca de café obtida pela via seca e fibras de sisal;

-Caracterizar a propriedade Térmica: condutividade térmica dos compósitos produzidos com a casca de café obtida pela via seca e fibras de sisal.

2.2.4 Capítulo 3

Classificar os resíduos sólidos gerados nas lavouras cafeeiras: casca de via úmida e casca de via seca pela normalização brasileira NBR ABNT 10004 (2004) – Resíduos Sólidos – Classificação.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 RESÍDUOS SÓLIDOS

A Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), instituída em 2010 pela Lei nº 12305, define resíduos sólidos:

> Resíduos sólidos: material, substância, objeto ou bem descartado resultante de atividades humanas em sociedade, a cuja destinação final se procede, se propõe proceder ou se está obrigado a proceder, nos estados sólido ou semissólido, bem como gases contidos em recipientes e líquidos cujas particularidades tornem inviável o seu lançamento na rede pública de esgotos ou em corpos d'água, ou exijam para isso soluções técnica ou economicamente inviáveis em face da melhor tecnologia disponível. (Lei nº 12305, 2010.Inciso II, Art. 3º, parágrafo XVI)

No artigo 13 da PNRS (2010) são estabelecidas as formas de classificação dos resíduos sólidos quanto a sua origem e sua periculosidade. Quanto à origem, os resíduos sólidos são classificados em resíduos domiciliares, resíduos de limpeza urbana, resíduos sólidos urbanos, resíduos de estabelecimentos comerciais e prestadores de serviços, resíduos dos serviços públicos de saneamento básico, resíduos industriais, resíduos de serviços de saúde, resíduos da construção civil, resíduos agrossilvopastoris, resíduos de serviços de transportes e resíduos de mineração. Quanto à periculosidade, os resíduos são classificados em resíduos perigosos e resíduos não perigosos.

Para o estudo de novas tecnologias de aplicação de resíduos sólidos não basta o conhecimento somente da sua classificação pela origem, outras propriedades físicas e químicas, bem como o seu volume gerado também devem ser levantadas. Esses aspectos juntamente com os impactos ao meio ambiente e à saúde humana decorrentes da liberação de gases, materiais particulados e do lixiviado são avaliados para a escolha estratégica de gerenciamento que priorizem a prevenção da poluição (CASTILHOSJR et al., 2006).

Os resíduos sólidos podem alterar o meio ambiente de diversas formas. Pode haver alteração da paisagem pela poluição visual, a liberação de maus odores ou substâncias químicas voláteis pela decomposição dos resíduos, materiais particulados podem ser dispersos pela ação do vento ou serem liberados juntos com gases tóxicos quando queimados. Substâncias podem ser liberadas pela lixiviação provocando a infiltração no solo e nos aquíferos subterrâneos ou o carreamento durante o escoamento superficial de águas pluviais, atingindo os corpos d'água. Os nutrientes, como nitrogênio e fósforo, podem causar a eutrofização e outras substâncias químicas podem ser tóxicas ou bioacumulativas na cadeia alimentar (CASTILHOSJR et al., 2006).

3.2 CULTIVO CAFEEIRO

É inegável a importância da cultura cafeeira para a economia mundial, especialmente para os países em desenvolvimento. Segundo a Organização Internacional do Café (OIC), para parte desses países, as divisas geradas com a exportação desse produto somente não superam as divisas geradas pela indústria do petróleo. Em alguns casos, correspondendo a 80% das receitas do território. No Brasil, o setor movimentou por volta de 17,46 bilhões de reais no ano de 2019 (COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO, 2019). O café surgiu como alimento, na Etiópia, onde era assado em gordura e ingerido com açúcar, formando uma pasta. Foi apenas na Idade Moderna (século XVI), que surgiu a infusão dos grãos na região do Oriente Médio, chegando à Europa em meados do século XVII e se tornando extremamente popular. Atualmente, é consumido por cerca de um terço da população mundial, portanto, há uma necessidade crescente em determinar os efeitos ambientais causados pelos resíduos gerados em seu processamento (CAFEICULTURA,2007; RATTAN et al., 2015).

O café é considerado um cultivo permanente e bianual, ou seja, demora dois anos para completar o seu ciclo biológico. Por isso, as plantações de café apresentam um efeito denominado de bienalidade, uma determinada safra possui uma produtividade maior do que a safra seguinte, devido a sua necessidade de recomposição vegetal.

No país, no ano de 2019, a safra apresentou bienalidade negativa e o país produziu por volta de 49 milhões de sacas de café, o que corresponde a 28% da produção mundial, incluindo as espécies arábica (34,5 milhões) e canéfora (14,5 milhões). Esse resultado coloca o Brasil em primeiro lugar na produção de café arábica e em segundo lugar na produção de café canéfora, atrás do Vietnã (EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA,2019). Aproximadamente, 95% de todo café consumido no mundo é derivado dessas duas espécies: *Coffea arábica* (café arábica) e *Coffea conephora* (conilon ou robusta) (DAVIS et al.,2011).

O grão arábica tem um sabor mais doce e macio, com alta quantidade de açúcar e apresenta uma acidez maior. O café canéfora ou robusta, no entanto, tem um sabor mais forte e áspero, com um tom granulado e um gosto residual de amendoim. Contêm duas vezes mais cafeína e geralmente são considerados de qualidade inferior em comparação com a espécie arábica, que por esse motivo, apresenta um maior preço de mercado (RATTAN et al., 2015).

Essas espécies são provenientes de plantações existentes em países como a Colômbia, o Vietnã, a Costa Rica, a Etiópia, Honduras, Índia, Angola, Indonésia, México e do Brasil, que

se caracteriza como o maior produtor, exportador e consumidor mundial de café. A Figura 1 apresenta os maiores produtores de café do mundo e suas respectivas produções de café, em milhões de sacas de 60Kg, nos anos de 2018 e 2019.

Figura 1– Produção mundial de café no ano cafeeiro de 2018/2019

Fonte: Organização Internacional do Café (OIC)

A produção do produto em todo o mundo, considerando o ano-cafeeiro de 2018/2019, foi estimada em 174,5 milhões de sacas, sendo 104 milhões de sacas da espécie arábica (60%) e 70,5 milhões de sacas de 60kg de café canéfora (40%) (EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA,2019).

A safra de 2020 prevê, em quase todas as regiões produtoras do país, a influência da bienalidade positiva, estimando uma produção maior que a obtida em 2019 (COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO, 2020).

O café, após a colheita, passa pelas etapas (Figura 2) de: a) pré-limpeza - remoção dos sólidos grosseiros como gravetos e folhas; b) limpeza – remoção das impurezas remanescentes; c) lavagem e separação – o café é lavado e os grãos de melhor qualidade (café verde), são separados dos grãos com qualidade comprometida (café boia) (MESQUITA,M. et al.,2016).

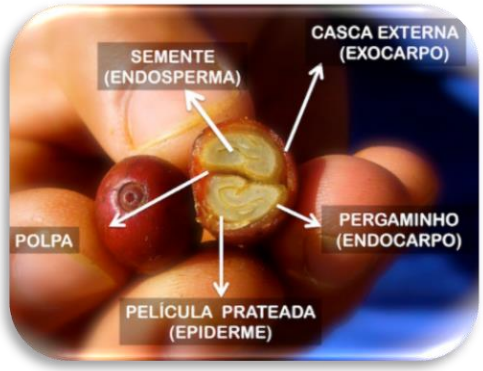
Figura 2– Etapas da limpeza do grão de café e separação do café boia

Fonte: (MESQUITA et al.,2016; INSTITUTO CAPIXABA DE PESQUISA, ASSISTÊNCIA TÉCNICA EXTENSÃO RURAL, 2017)

Em seguida, o café é processado essencialmente de duas maneiras: por via seca ou por via úmida, sendo a via seca a mais difundida atualmente no Brasil (MESQUITA,M.et al.,2016).

Para um melhor entendimento desses dois processos é necessário, primeiramente, conhecer a estrutura morfológica do grão de café (Figura 3).

Figura 3– Morfologia do grão de café



Fonte: (THE COFFE TRAVELLER,2015)

O beneficiamento por via seca, consiste na secagem do fruto cafeeiro sem a remoção da polpa (mesocarpo). Ao final desse processo, o café recebe a denominação de café natural ou café em coco. A secagem do café pode ser realizada por secadores mecânicos ou através da disposição do grão no terreiro de secagem (INSTITUTO CAPIXABA DE PESQUISA, ASSISTÊNCIA TÉCNICA EXTENSÃO RURAL, 2017) (Figura 4).

Figura 4– Etapa de secagem do grão

Fonte: (MESQUITA, M. et al.,2016)

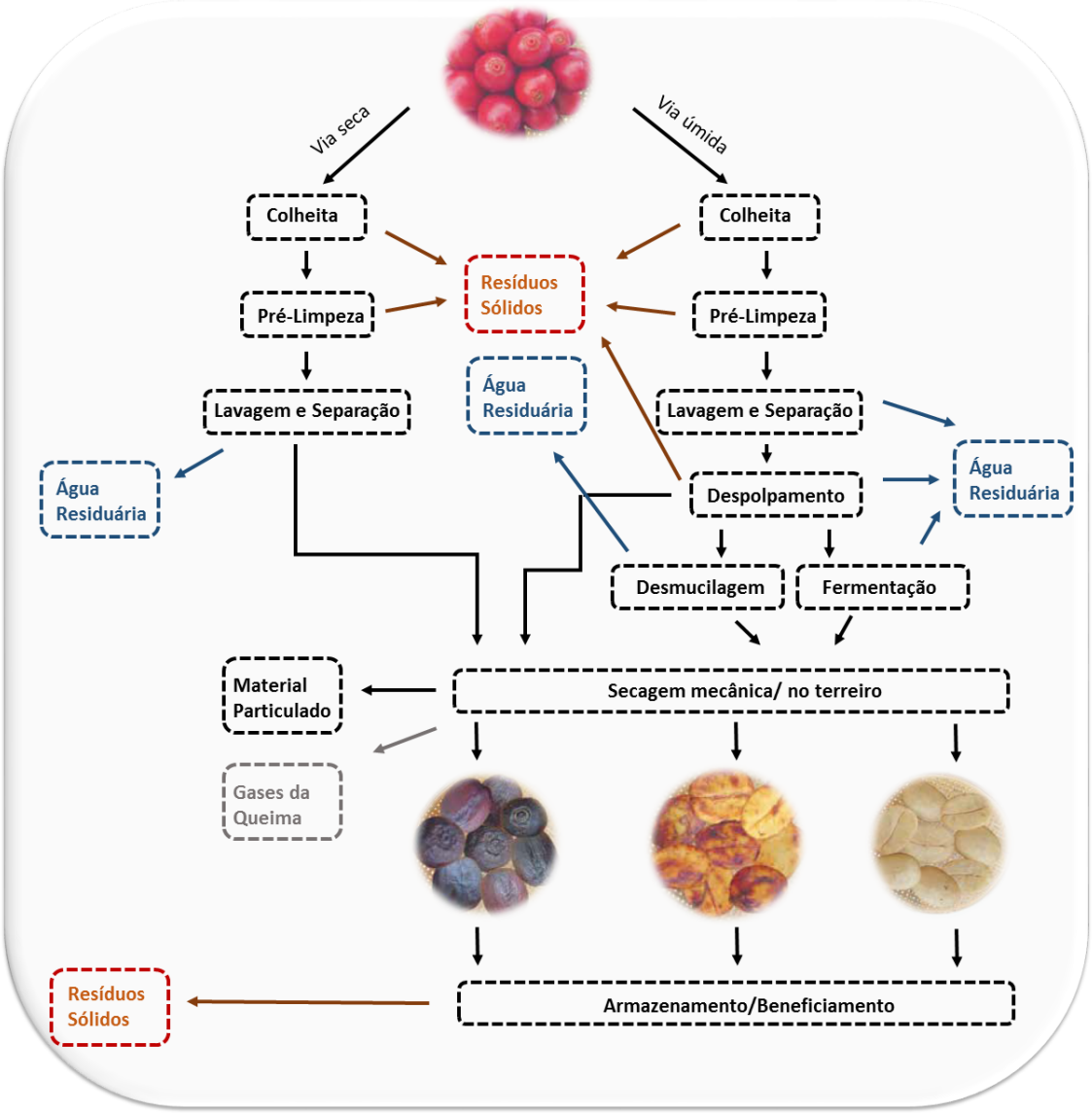
No processamento por via úmida, a secagem só é realizada depois de as cerejas maduras terem sido descascadas (despolpamento) e os grãos de café, protegidos apenas pelo pergaminho (endocarpo) e pela película prateada (espermoderma ou epiderme), recebem a denominação de cereja descascado, CD ou despolpados. Pode-se, também, remover a mucilagem aderida aos grãos para facilitar a secagem, sendo a mucilagem caracterizada por uma goma, que também faz parte da constituição da polpa e é retirada em tanques de fermentação ou de forma mecânica (INSTITUTO CAPIXABA DE PESQUISA, ASSISTÊNCIA TÉCNICA EXTENSÃO RURAL, 2017) (Figura 5).

Figura 5– Etapas de despolpamento e desmucilagem

Fonte: (INSTITUTO CAPIXABA DE PESQUISA, ASSISTÊNCIA TÉCNICA EXTENSÃO RURAL, 2017)

Um resumo do processamento por essas duas vias é apresentado na Figura 6, a seguir:

Figura 6 – Processo de beneficiamento do café por via seca e por via úmida



Fonte: (MESQUITA, M. et al.,2016; VILLA-MONTOYA, 2019) modificado

A produção brasileira de café concentra-se nos estados de Minas Gerais (MG), Espírito Santo (ES), São Paulo (SP), Paraná (PR), Rondônia (RO) e Bahia (BA), que são os responsáveis por mais de 97% da produção nacional. Segundo as estimativas da Companhia Nacional de Abastecimento (2019) para o ano de 2020, a produção de café para esses estados foi estimada em 30 milhões de sacas para o estado de Minas Gerais, 14 milhões para o Espírito Santo, 6

milhões de sacas de café para São Paulo, 4 milhões para Bahia, 2 milhões para Rondônia e 900 mil para o Paraná.

3.3 RESÍDUOS DE CAFÉ

Os resíduos da produção de café são classificados pelo artigo 13 da Política Nacional de Resíduos Sólidos como sendo de origem agrossilvopastoril. Os dados mais recentes sobre os montantes de resíduos sólidos orgânicos gerados nas atividades agrossilvopastoris, no Brasil, estão disponíveis no portal do Sistema Nacional de Informações sobre a Gestão dos Resíduos Sólidos (SINIR), através do Caderno Preliminar de Diagnóstico elaborado em 2011 pelo Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (Ipea). Nesse relatório são apresentados os dados da geração de resíduos resultantes das principais culturas brasileiras no ano de 2009 (Tabela 1).

Tabela 1 – Geração de resíduos na agroindústria para as principais culturas brasileiras por região e em todo território nacional

Culturas	Norte (%)	Nordeste (%)	Sul (%)	Sudeste (%)	Centro-Oeste (%)	Resíduos (ton)
Café	5	7	4	83	1	1.220.029
Banana	12	38	15	31	4	99.640
Laranja	1	10	5	83	1	8.825.276
Coco	15	69	0,1	14	2	405.009
Castanha de Cajú	1	99	0	0,25	0	80.484
Soja	2	8	32	7	51	41.862.129
Milho	3	9	37	20	31	29.432.678
Cana de açúcar	0,3	11	8	68	13	201.418.487
Feijão	4	24	31	26	15	1.847.984
Arroz	8	9	72	1	10	2.530.355
Trigo	0	0	92	4	4	3.033.315
					Total	290.755.386

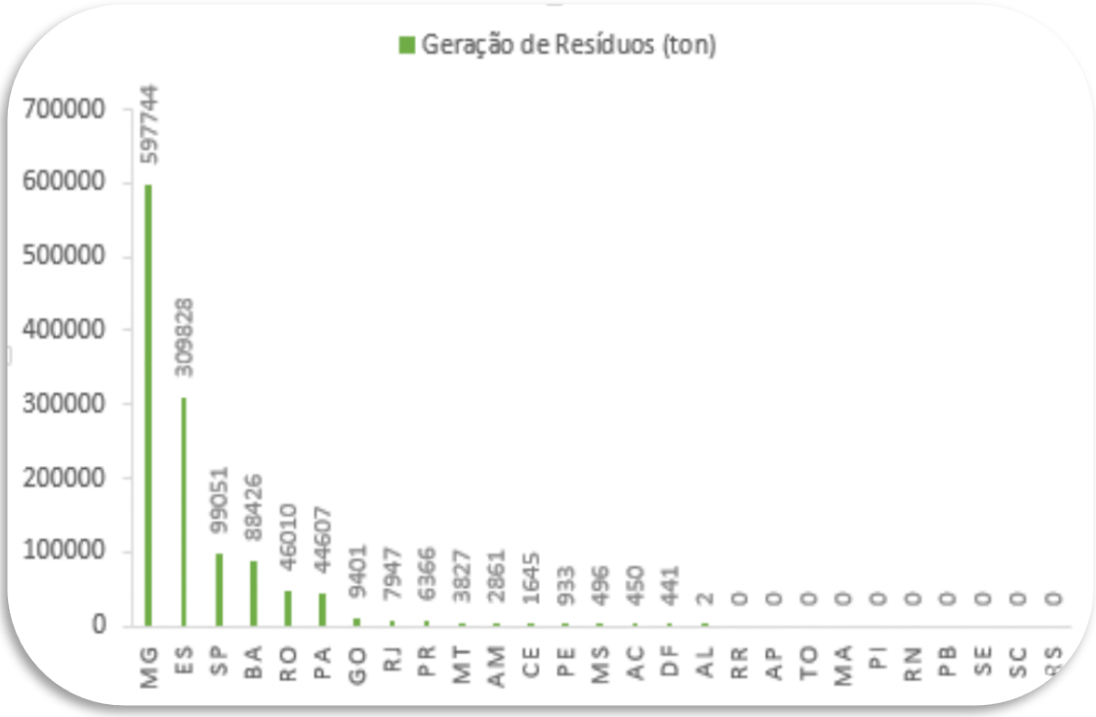
Fonte: (SISTEMA NACIONAL DE INFORMAÇÕES SOBRE A GESTÃO DOS RESÍDUOS SÓLIDOS,2011)

Observa-se, pela Tabela 1, que o Brasil produziu cerca de 1,3 milhões de toneladas de resíduos de café durante o ano de 2009. É estimada que a quantidade de resíduo gerado no processo de beneficiamento ocorre na proporção de 1:1, ou seja, a cada safra, a quantidade de café beneficiado é igual à quantidade de resíduo gerado pelo seu beneficiamento (BRUM, 2007).

Após o ano de 2009, não foi divulgado outro diagnóstico e observa-se, também, que o Brasil produziu cerca de 290.755.386 milhões de toneladas de resíduos agrícolas durante este

ano. Na Figura 7, apresenta-se um demonstrativo da quantidade de resíduos sólidos gerados pelo cultivo cafeeiro por cada estado brasileiro.

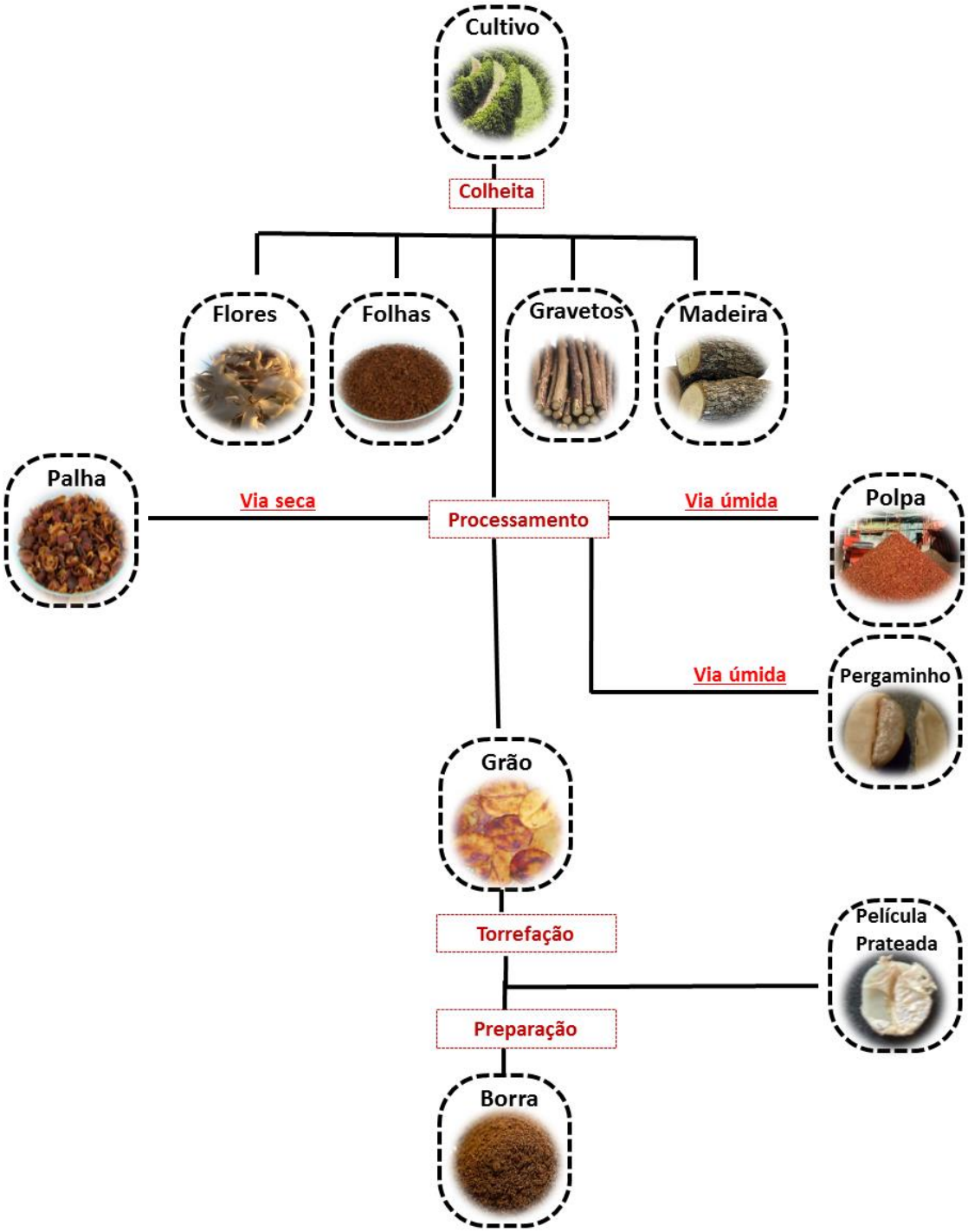
Figura 7– Geração de resíduos da agroindústria do café no ano base de 2009 por estado brasileiro



Fonte: (SISTEMA NACIONAL DE INFORMAÇÕES SOBRE A GESTÃO DOS RESÍDUOS SÓLIDOS,2011)

Os principais resíduos gerados durante o processamento do café são compostos de epicarpo (casca), mesocarpo (polpa) e endocarpo (pergaminho) (MATIELO,1991). No processo por via seca, os frutos são secos integralmente e se obtém como resíduo sólido, após o beneficiamento do grão de café, a casca aderida a polpa e ao pergaminho (BARTHOLO et al., 1989). Esse resíduo é comumente chamado de palha de café. Quando o processamento é realizado por via úmida, retiram-se a casca e a polpa na etapa de despolpamento, ou seja, o resíduo gerado é composto de casca, polpa e água residuária. Após o beneficiamento do grão de café obtido por essa via, tem-se o pergaminho (endocarpo) como resíduo sólido. A película prateada (espermoderma) é retirada após o processo de torrefação do grão de café e a borra de café é gerada após a preparação da bebida. (Figura 8).

Figura 8 - Subprodutos da indústria do café



Fonte: KLINGEL et al.,2020; THE COFFE TRAVELLER,2015; BORÉM, 2008

Segundo o levantamento de janeiro de 2020, da Companhia Nacional de Abastecimento (Conab), a estimativa da safra brasileira de café, para esse ano, foi de aproximadamente 60 milhões de sacas de 60 kg de café beneficiado. Estima-se, dessa maneira, uma geração de 4 milhões de toneladas de resíduos de café, o que representa um valor quase 3 vezes maior do que o valor divulgado para 2009. A Organização Internacional do Café (OIC) supõe um crescimento de 2 por cento ao ano na demanda mundial pelo produto até 2030, o que implica consequentemente em um crescimento, também, da produção de resíduos (REUTERS,2017).

Em 2017, em contato com produtores de três fazendas de café de Minas Gerais e de uma fazenda de São Paulo, lhes foi perguntado qual era a quantidade de casca de café produzida em sua propriedade e qual era a sua destinação. A via de produção do resíduo não foi especificada.

O produtor da cidade de Paraguaçu/MG respondeu que em sua fazenda havia o montante de 50 toneladas. Parte era destinada para as lavouras, por se tratar de um produto rico em potássio, fósforo e ajudava a melhorar o índice de matéria orgânica no solo; e que a parte excedente era vendida para o exterior. Foi questionado, também, se ele considerava interessante um outro tipo de alternativa para esse resíduo como, por exemplo, para a fabricação de móveis ou embalagens, ele respondeu afirmativamente e que teria interesse em realizar investimentos para a produção desse tipo de produto.

O representante da fazenda do Alto Caparaó/MG, que realiza um manejo de cultivo agroflorestal, retorna as cascas para a lavoura para a ciclagem de nutrientes, apesar de ter apontado a dificuldade de se encontrar mão de obra disponível para esse trabalho e de alternativas de mecanização para uma região montanhosa. A cultura gera em torno de 15 toneladas desse resíduo e uma outra parte da casca é destinada para pesquisas com o intuito do desenvolvimento de chá da casca (cascara), pois a fazenda não utiliza agrotóxicos.

O agricultor da cidade de Pedregulho/SP estima uma geração em torno de 400 toneladas de casca em sua propriedade. Até 2016, todo o resíduo era enviado para um pátio industrial para sua posterior queima em caldeira. No ano de 2017, a fazenda iria experimentar a compostagem como alternativa de parte da destinação. Destacou como um ponto crítico da geração do resíduo, a disposição ou o armazenamento desse material na lavoura, explicando que se a pilha da casca fica exposta a chuva, esse material acaba se decompondo e gerando como resultado a fermentação do chorume. Explicou, também, que no café, quando o chorume escorre e concentra-se em um único ponto, ocorre o que chamam popularmente de “queima” do pé de café, ocasionado principalmente pela alta concentração de potássio.

Ao perguntar o que ele achava da possibilidade de transformar esse insumo, em um outro produto de maior valor econômico, respondeu que achava interessante o desenvolvimento de pesquisas com esse objetivo, como já acontece com o bagaço de cana-de-açúcar. Segundo o produtor, teria um ótimo apelo ambiental para linhas de produtos que tenham como foco a redução da pegada de carbono. Afirmou que teria interesse em realizar investimentos em processos que utilizam a casca, como já iria realizar com o processo de compostagem.

O produtor da cidade de Carmo da Cachoeira/MG estima uma geração de 500 toneladas de resíduos em sua fazenda, afirmou que aplica o produto em sua lavoura após a compostagem com esterco de galinha e que o restante desse recurso era utilizado como matéria prima para fornalhas. Salientou que a mistura com o esterco era trabalhosa e relatou que teria o interesse de vender a casca, pois era uma prática que realizou nos anos nos quais conseguiu um bom preço por elas.

Em 2020, um pequeno produtor da cidade de Santa Margarida/MG estimou a geração de 8 toneladas de resíduos em sua propriedade, os destina para a lavoura e as hortas de sua fazenda e apontou a dificuldade da mão de obra em coletar, transportar e dispor esses resíduos. No entanto, mencionou que nem sempre essa destinação pode ser realizada, pois, em determinadas safras, vende o café diretamente para os beneficiadores, sem a remoção da casca (café em coco). Afirmou que se interessaria em investir em produtos que agregasse valor econômico a esse recurso.

Na propriedade rural onde foi realizada a coleta das cascas de café, obtidas por via seca, para a realização dos experimentos dessa pesquisa, na cidade de São Carlos/SP, a produtora não soube estimar a quantidade de palha gerada, pois ela beneficiava o café de mais fazendas da região. Parte do resíduo retornava para as lavouras e outra parte era enviada para a queima em fornalhas. Para as cascas obtidas por via úmida, colhidas em uma outra fazenda da cidade de Pedregulho/SP, o agricultor ao ser perguntado sobre a geração da casca de café, respondeu que a produção era de 50%, 50% de produção de casca, para 50% de produção do grão de café e afirmou que dispersava os resíduos no próprio cultivo.

Atualmente, apesar do cultivo cafeeiro brasileiro ser extensivamente mapeado por órgãos oficiais como o Ministério da Agricultura e Pecuária (MAPA), a Companhia Nacional de Abastecimento (Conab) e também pela Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa), o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) , além de outros órgãos estaduais, devido essencialmente a sua grande importância econômica para o país, não foi

encontrado um diagnóstico com informações centralizadas sobre a destinação dos resíduos agrícolas gerados pela atividade cafeeira.

3.4 IMPACTOS GERADOS PELOS RESÍDUOS ORGÂNICOS ASSOCIADOS À AGRICULTURA

Os impactos associados a esse tipo de resíduo decorrem principalmente da sua alta geração em termos quantitativos. Essa alta geração, pode acarretar a disposição inadequada dos resíduos em cursos de água, no solo e promover queimadas a céu aberto.

Como consequência dessa disposição inadequada, tem-se à adição excessiva de matéria orgânica, adição de metais e compostos orgânicos persistentes no solo e na água e a intensificação do efeito estufa. No que diz respeito ao acréscimo de matéria orgânica no solo e na água, tem-se como impacto a geração de gases, a saturação do solo e a eutrofização de recursos hídricos. A adição de metais é consequência da adição de agroquímicos nas lavouras, sendo que parte dos metais ficam agregados nos resíduos e contribuem para a contaminação. A presença de compostos orgânicos persistentes é em decorrência do uso de inseticidas, estes compostos resistem a degradação química, fotolítica e biológica e se acumulam na cadeia alimentar (INSTITUTO DE PESQUISA ECONOMICA APLICADA,2012).

Matos, Santos e Fia (2000) visando avaliar a contaminação do solo com íons lixiviados de pilhas de casca de frutos cafeeiros, coletaram amostras, em diferentes profundidades, de áreas usadas como depósito do resíduo por três safras consecutivas. Os resultados indicaram forte contaminação do solo e concluiu-se que o uso contínuo da área como depósito determinará em uma inevitável contaminação do solo em profundidade e das águas subterrâneas.

Cieslinkski et al. (2014) monitoraram as emissões de gases poluentes como o monóxido de carbono, dióxido de carbono e óxidos de nitrogênio produzidos durante a queima da casca do café. Os resultados mostraram que todas as emissões gasosas ultrapassaram os limites de emissão estabelecidos pela CONAMA nº 03/90 e CONAMA nº 382/06.

3.5 RECUPERAÇÃO DOS RESÍDUOS AGRÍCOLAS

Os resíduos agrícolas são fontes ricas de materiais lignocelulósicos que podem ser utilizados na geração de diferentes produtos.

Dessa forma, uma vasta gama de pesquisas têm sido desenvolvidas com o intuito de utilizar os resíduos agrícolas na produção de materiais de maior valor agregado ou de utilizá-los como

matéria prima para seu aproveitamento enérgico. Sendo esse, um dos princípios idealizados pela Política Nacional de Resíduos Sólidos: fazer com que aconteça “o reconhecimento do resíduo sólido reutilizável e reciclável como um bem econômico e de valor social, gerador de trabalho e renda e promotor da cidadania” (Lei no 12305, 2010. Inciso II, Art. 6o, parágrafo VII). A Política Nacional de Resíduos Sólidos também estipulou como um dos seus objetivos o “incentivo à indústria da reciclagem, tendo em vista fomentar o uso de matérias-primas e insumos derivados de materiais recicláveis e reciclados”; (Lei no 12305, 2010. Inciso II, Art. 7 o, parágrafo VI). Outro objetivo explícito na lei é a “prioridade, nas aquisições e contratações governamentais, para produtos reciclados e recicláveis.

O atual modelo linear de economia baseado na extração de recursos naturais, produção, consumo e posterior descarte dos resíduos sólidos gerados está se tornando insustentável. Diante da exaustão dos recursos naturais e dos impactos ambientais negativos gerados por esse modelo econômico, é crescente a necessidade de uma transição para um modelo circular de economia, mais resiliente e sustentável (CRUZ, 2015).

Um modelo econômico circular tem como premissa manter materiais e produtos em ciclos produtivos durante o maior tempo possível, minimizando sua disposição final. Consiste em uma economia restaurativa e regenerativa, que agrega valor aos resíduos e oferece novas oportunidades de negócios aos sistemas produtivos.

Para que essa transição ocorra, é imprescindível a utilização de recursos renováveis na concepção de produtos e o desenvolvimento de tecnologias que permitam a reciclagem e a destinação adequada de resíduos sólidos.

Apesar de não apresentar explicitamente o conceito de Economia Circular, pode-se inferir que a Política propõe aspectos para a transição de uma Economia Linear para uma Economia Circular, ao trazer, por exemplo, a diferenciação entre resíduos e rejeitos e estabelecer que somente os rejeitos devem possuir uma disposição final. Definiu como rejeitos os resíduos sólidos que, depois de esgotadas todas as possibilidades de tratamento e recuperação por processos tecnológicos disponíveis e economicamente viáveis, não apresentem outra possibilidade que não a disposição ambientalmente adequada. Dessa forma, através dessa diretriz e de outros instrumentos, estimula a recuperação dos resíduos.

Klingel et al. (2020) apontam que adicionar valor econômico aos subprodutos da cultura do café, ajudaria a promover a prosperidade social dos trabalhadores rurais, principalmente das regiões mais pobres, que sofrem com as flutuações de preço do produto no mercado, especialmente em períodos de crise econômica. Esclarece, que muitos pequenos produtores

apresentam dificuldades em manter o pagamento da mão de obra necessária para a colheita, pois a mão de obra representa por volta de 70% dos custos de produção e o pagamento é realizado por diárias de trabalho. Além disso, o desenvolvimento de novos produtos, permitiria o emprego do trabalhador rural durante todo o ano e não somente durante o período de colheita da safra. Dessa forma, criaria a possibilidade para o trabalhador de fixar residência em um único lugar, se tornando parte integrante de uma comunidade.

Como alternativas para a destinação adequada dos resíduos agrícolas, sua valoração econômica ou seu aproveitamento de massa e energia destacam-se a biodigestão anaeróbia, a disposição no solo e compostagem, a cogeração de energia e a produção de compósitos de painéis de madeira reconstituídos.

3.5.1 Biodigestão

Entre os trabalhos que discorrem sobre a potencialidade de geração de biogás por parte de resíduos agrícolas citam-se os desenvolvidos por Hardwood (1980), Sharma et al. (1998), Viswanath et al. (1991), Boullagui et al. (2005), Henrard et al. (2007), Tock et al. (2010) e Batista (2014).

Para os resíduos sólidos da produção de café, foi encontrada somente uma pesquisa sobre a produção de biogás utilizando esse resíduo como biomassa (VILLA-MONTOYA, 2019) e pesquisas que abordaram aspectos do aproveitamento energético da água residuária do beneficiamento do café por via úmida.

Também, destaca-se o trabalho desenvolvido pela fazenda Oliveira, no centro oeste do Estado de Minas Gerais, que além da plantação de café, realiza como atividade econômica a criação de suínos e dessa forma utiliza os resíduos dessas duas atividades, em conjunto, para a produção de metano como biogás (FERNANDES,2014).

O processo de biodigestão anaeróbia tem como vantagens a produção de biofertilizantes associado à geração de biogás. Porém, exige mão de obra especializada e ainda a tecnologia não é consolidada para resíduos agrícolas em escalas comerciais (BATISTA,2014). Ademais, a estrutura lignocelulósica dos resíduos agrícolas dificultam a sua biodegradabilidade, exigindo pré-tratamentos para a diminuição da sua cristalinidade e rigidez (VILLA-MONTOYA et al., 2017; ABU TAYEH et al., 2016).

3.5.2 Disposição no solo e compostagem

A reciclagem dos resíduos orgânicos gerados nas atividades agrícolas para uso na própria agricultura, caracteriza-se como uma forma de reaproveitamento desses resíduos. O aporte adequado desses materiais no solo tem efeito condicionador, melhorando as características químicas (capacidade de troca de cátions e complexação de elementos tóxicos); físicas (estrutura , retenção de água, densidade) e biológicas (microfauna e microflora). Em adição, agrega-se valor a resíduos, antes indesejáveis, e agora transformados em insumos (PIGATIN,2017).

Porém, pouco se sabe sobre o efeito das características do resíduo, do clima e da forma de disposição no solo, entre outros fatores, sobre a taxa de mineralização desses resíduos no solo. Consequentemente, não existem muitas informações de campo sobre a disponibilização de nitrogênio depois da disposição do resíduo orgânico. É necessário estabelecer critérios e práticas técnicas adequadas para atender as necessidades nutricionais das culturas, do solo e dos mananciais de água superficial e subterrânea, em áreas de disposição final desses resíduos (PAULA, 2012).

Considera-se que as principais preocupações do agricultor, no que se refere ao uso de resíduos orgânicos, devem estar voltadas para o estabelecimento de uma quantidade de nitrogênio e de outros nutrientes, além de compostos inorgânicos e orgânicos tóxicos, patógenos e vetores de doenças (ABREUJR et.al.,2005).

Segundo os Engenheiros Agrônomos J.B. Matiello da Fundação Procafé e Hugo Siqueira , o retorno da palha de café para o solo é uma fonte de adubo orgânico produzida nas próprias fazendas, não sendo necessário despesas adicionais com o transporte. Sendo que a dose empregada vai depender da necessidade do solo, conforme análise. A regra ideal é usar menores doses em mais áreas, pela vantagem do seu efeito orgânico e provedor de nutrientes lentamente disponíveis. O uso da palha deve, sempre, considerar o equilíbrio entre o potássio e cálcio e magnésio, visto que essa matéria orgânica possui alto teor de K (MATIELLO,2016).

Alguns obstáculos, contudo, podem dificultar a distribuição desse resíduo no cafezal e por vezes desestimular os agricultores a optarem por essa destinação: a) ausência de conhecimento sobre a dose adequada e formas de distribuição; b) o chorume que é liberado das pilhas de resíduos chegam a matar as plantas próximas aos montes e sem o conhecimento adequando, alguns agricultores receiam que esse material será prejudicial também à plantação; c) se o resíduo não for distribuído em camadas finas, poderá atrair larvas de moscas, prejudiciais aos animais bovinos; d) aumento de incidência de plantas daninhas; e) a distribuição do resíduo na lavoura dificulta o recolhimento do café de varrição; f) em fazendas não mecanizadas, a mão

de obra é muitas vezes cara e escassa durante a colheita e não há o interesse do agricultor em ter custos adicionais para o espalhamento da casca ou sua compostagem; g) em áreas montanhosas o resíduo úmido e pesado pode ser de difícil distribuição (MATIELLO,2016).

A compostagem é uma alternativa que apresenta muitas vantagens ambientais. Ressalta-se, porém, que essas vantagens somente serão obtidas se houver controle adequado do processo. Considerando que o metabolismo dos microrganismos envolvidos na compostagem é sensível às variações de temperatura, nível de oxigênio, quantidade e qualidade do material compostável, relação C/N, pH e disponibilidade de nutrientes (MASSUKADO,2008).

3.5.3 Cogeração de energia

No que diz respeito à combustão direta dos resíduos agrícolas, entre os trabalhos que avaliam a viabilidade técnica e econômica dessa tecnologia destacam-se os desenvolvidos por Melo,et al. (2005) ,Haykini-Acma e Yaman (2011), Kok e Ozgur (2013) e Batista (2014).A queima da biomassa representa o processo energético mais disseminado, podendo ser realizado nos mais variados tipos de equipamentos como fogões, fornos e caldeiras. Por não demandar equipamentos de alto aperfeiçoamento tecnológico, o processo de combustão geralmente é muito ineficiente (CORTEZ,2011).

Como principais vantagens dessa tecnologia têm –se o aproveitamento de resíduos gerados na própria propriedade agrícola, o aproveitamento da energia térmica que pode ser utilizada em outros processos (Figura 9), como a geração de energia elétrica e por fim, a disponibilidade de fabricação nacional de equipamentos com diversas opções de fornecedores. Como desvantagens têm-se concentração de fabricantes de equipamentos nas regiões Sul e Sudeste, que implica em elevados custos de frete para outras regiões do país, heterogeneidade dos resíduos que dificulta o controle de variáveis operacionais, liberação de materiais particulados no ar, conhecido como fumaça negra (WIECHETECK, 2009). Um dos resíduos agrícolas mais utilizados como biomassa para a geração de energia por combustão direta é o bagaço de cana de açúcar (SILVA, 2014).

Figura 9 – Casca de café utilizada como combustível

Fonte: ACCHAR;DULTRA, 2015

MELO et al. (2005) avaliou a viabilidade energética da palha de café como complemento da lenha em uma fornalha para secagem de grãos e a eficiência energética foi satisfatória. Porém, é necessário um controle ambiental desse processo de secagem, para impedir impactos ambientais negativos (Figura 10).

Figura 10– Secagem em altas temperaturas e falta de controle ambiental

Fonte: INSTITUTO CAPIXABA DE PESQUISA, ASSISTÊNCIA TÉCNICA EXTENSÃO RURAL, 2017

Faria et al. (2015) avaliou o potencial dos resíduos do processamento dos grãos de café na produção de pellets, para a geração de energia térmica e classificou os resíduos quanto à possibilidade de comercialização para União Europeia utilizando a norma DIN EM 14961-6 como parâmetro. Os pallets atenderam os requisitos da norma e concluiu-se que os resíduos do beneficiamento do café podem ser transformados em biocombustíveis sólidos granulados.

No entanto, a queima do café gera as cinzas como resíduo sólido (Figura 11). Essa cinza pode ser disposta de maneira inadequada, sem tratamento, na propriedade rural, em beira de estradas e perto de cursos de água (Figura 12) (DULTRA,2010).

Figura 11 – Cinzas da casca de café

Fonte: DULTRA, 2010

Figura 12 – Disposição inapropriada das cinzas

Fonte: ACCHAR;DULTRA, 2015

Cabe salientar, que a Política Nacional de Resíduos Sólidos determina que o reaproveitamento e a reciclagem tenham preferência sobre o aproveitamento térmico.

3.5.4 Painéis de madeira reconstituídos

Segundo a norma ASTM D3878-95, compósito é uma substância consistindo de dois ou mais materiais, insolúveis entre si, que são combinados para formar um material de engenharia útil. Os painéis de madeira são compósitos formados por lâminas, sarrafos, partículas e fibras de madeira, reconstituídos por meio de um adesivo.

O setor de painéis de madeira do Brasil é o sexto maior do mundo. Sendo que, a matéria prima desses painéis tem origem, em sua maioria, de florestas plantadas (ABRAF, 2013). Dentre os diferentes tipos de painéis de madeira, o mais comum é o Painel de Partículas de Média Densidade ou MDP, utilizados na construção civil para a fabricação de móveis, divisórias, pisos de madeira, revestimento interno e externo em edificações e como material de isolamento. Aproximadamente, 50% dos painéis reconstituídos de madeira no Brasil são painéis de partículas (SILVA et al., 2013).

Apesar da madeira utilizada para a fabricação dos painéis ter como origem as florestas plantadas, portanto, é um material derivado de um recurso renovável, é essencial que ocorra um manejo adequado das áreas florestais para que não ocorra impactos na sua extração ou cause efeitos negativos sobre os recursos hídricos disponíveis na unidade da microbacia.

O manejo adequado das florestas plantadas integrado com as microbacias envolvem muitos fatores ambientais e antrópicos e ainda não está consolidado no Brasil ou em outros países da América Latina. Como consequência, surgem pressões de ambientalistas, dúvidas e reclamações de proprietários rurais, opiniões da impressa e impactos de um manejo inadequado (LIMA,2004). Nesse contexto, a produção de painéis de partículas de resíduos sólidos agrícolas se tornam uma alternativa para a diminuição da utilização da madeira, além de agregar valor aos resíduos, atender à crescente demanda da indústria de painéis de madeira e, também, soma-se o fato que o crescimento da madeira pode levar anos enquanto que os cultivos agrícolas são em sua maioria anuais e as culturas se desenvolvem rapidamente (MENDES et al., 2010).

Santos et al. (2014) desenvolveram uma pesquisa comparando o ciclo de vida de painéis de partículas produzidos com bagaço de cana de açúcar e os produzidos com madeira de *Pinus elliottii*. Os resultados demonstraram que o painel engenheirado com o resíduo apresentou menor impacto ambiental.

Quanto ao uso da casca de café, apenas quatro estudos anteriores avaliaram a adição desse resíduo em painéis de partículas. Esse fato evidencia a necessidade de mais pesquisas sobre o tema para a produção de painéis com melhores propriedades ou com condições de fabricação mais otimizadas.

Araújo (2015) utilizou resíduos do processamento industrial da casca de café por via seca, partículas de bambu da espécie *Dendrocalamus giganteus* e a resina poliuretana de mamona na fabricação de painéis de partículas em três camadas. Foi concluído que os painéis confeccionados com adição de 10%, 20% e 30% de casca de café podem ser utilizados comercialmente para uso interno, não estrutural e em condições secas.

Mendes et al. (2010) avaliou a influência da incorporação de casca de café nas propriedades físicos-mecânicas de painéis aglomerados produzidos com *Eucalyptus urophylla S.T.Blake*. Os painéis foram produzidos com incorporação de 25,50 e 75% de casca de café, em três teores de resina fenol-formaldeído e parafina.

Bekalo e Reinhardt (2010) produziram painéis de partículas com casca de café e os resultados obtidos indicaram que a adição de até 50% de casca proporciona resultados satisfatórios nas propriedades físicas e mecânicas das chapas de madeira. Os autores ainda concluíram que a melhor utilização para os painéis refere-se ao seu uso como isolante térmico.

Scatolino et al. (2017) utilizaram o pergaminho na produção de painéis particulados em conjunto com partículas de madeira de eucalipto. Foi estudado os teores de substituição de 0%,10%,30%, 40% e 50% das partículas de madeira pelo resíduo e o painel foi confeccionado com 8% da resina ureia-formaldeído.

Esse tipo de destinação será o foco dessa pesquisa e seus principais aspectos, assim como as pesquisas relacionadas a sua produção, serão abordadas no próximo item.

3.6 PAINÉIS DE PARTÍCULAS AGLOMERADAS

De acordo com a “ABNT NBR 14810 -2: 2006 – Chapas de madeira aglomerada”, chapa de partículas de madeira é um produto em forma de painel, que pode variar em espessura de 3 mm a 50 mm, constituído de madeira aglomerada com resinas naturais ou sintéticas, sob a ação de pressão e calor, sendo que a geometria das partículas e sua homogeneidade e outros parâmetros podem ser modificados para fabricar produtos adequados aos usos finais específicos.

Os painéis de partículas surgiram industrialmente na década de 1940, na Alemanha, diante da dificuldade de obtenção de madeiras durante a segunda guerra mundial. No Brasil, os primeiros painéis foram fabricados em 1966, na cidade de Curitiba-PR, mas assumiram um papel de destaque no mercado nacional no final dos anos 90 (IWAKIRI et al.,2005).

A demanda por esse tipo de produto aumentou ao longo dos anos em decorrência do aumento da população e de novas áreas de aplicação, o que causou uma pressão significativa para a preservação das florestas. Consequentemente, fabricantes e cientistas passaram a utilizar biomassas renováveis para sua produção (ROWEL et. al., 2000). De acordo com Bektas et al (2005), já são utilizadas mais de 30 plantas como biomassa renovável na produção de painéis ao redor do mundo. A princípio, esses painéis podem ser fabricados a partir de qualquer material lignocelulósico, que lhes confiram resistência mecânica.

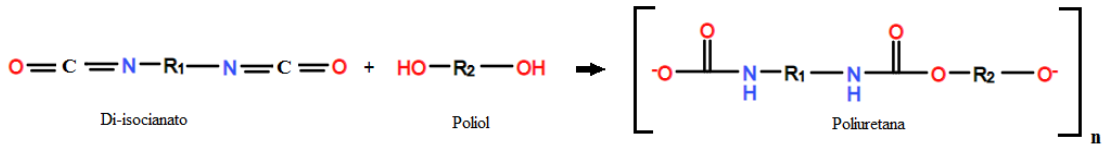
De maneira geral, a literatura relata a produção dos painéis de partículas em três etapas, na qual a primeira consiste na geração de partículas, a segunda corresponde na aplicação da resina e a última na formação dos painéis por prensagem.

As chapas de aglomerado apresentam três configurações básicas: homogêneas, de múltiplas camadas e graduadas. Nos painéis homogêneos, as partículas são distribuídas ao acaso; nas chapas de múltiplas camadas, as partículas mais finas se distribuem nas superfícies (15% a 20%) e as mais grossas no meio do material; na configuração granulada, há uma variação gradativa do tamanho das partículas através das mais finas nas faces para as mais grossas no centro (MALONEY,1977).

3.6.1 Resina Poliureta derivada do óleo de mamona

Segundo Araújo (1998), a poliuretana (PU) é um tipo de polímero termorrígido particularmente versátil, com aplicações diversificadas, sendo um material caracterizado pela presença do grupo polar uretana -NH-CO-O- e sintetizada a partir de uma reação química de poliadição entre um grupo isociato e um poliol (Figura 13).

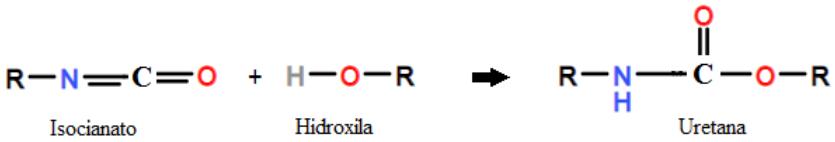
Figura 13– Síntese da Poliuretana



Fonte: PEREIRA,2010

A história das poliuretanas começou em 1937 com Otto Bayer, na empresa alemã I. G. Farbenindustrie, predecessora da Bayer. O principal impulso para esse trabalho foi o sucesso alcançado por Wallace Carothers (Du Pont) na fabricação de poliamidas e poliésteres. Bayer e seus colegas estavam tentando encontrar um caminho para materiais semelhantes sem infringir as regras de patentes da Du Pont. A síntese e as reações básicas de isocianatos foram exploradas no começo do século XIX (1849) por Wurtz (Figura 14) e Otto Bayer utilizou essas já conhecidas reações de adição do grupo isocianato com álcoois para o desenvolvimento de macromoléculas a partir de diisocianados e dióis (DODGE,2003).

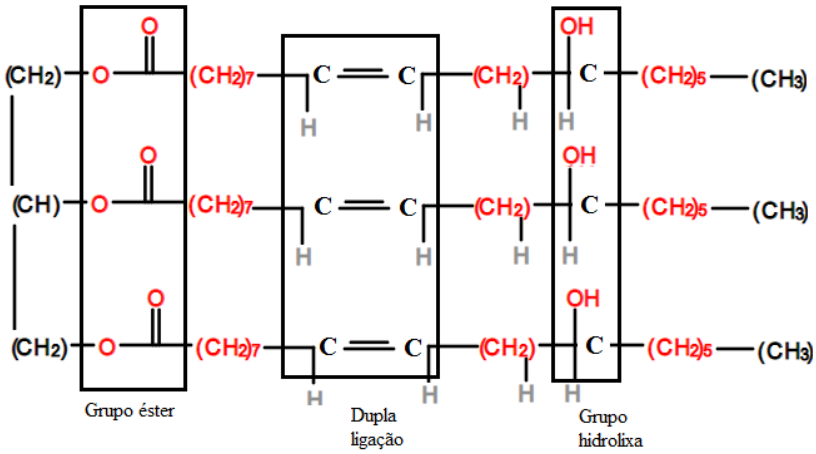
Figura 14 – Síntese da Uretana



Fonte: PEREIRA,2010

Os polióis derivados do óleo de mamona são obtidos por modificações estruturais do ácido ricinoléico (ácido 12-hidroxileico). O ácido ricinoléico (Figura 15) é pouco frequente nos óleos vegetais, sendo um ácido graxo hidroxilado e presente com um teor de 89% na composição do óleo de mamona (PEREIRA,2010).

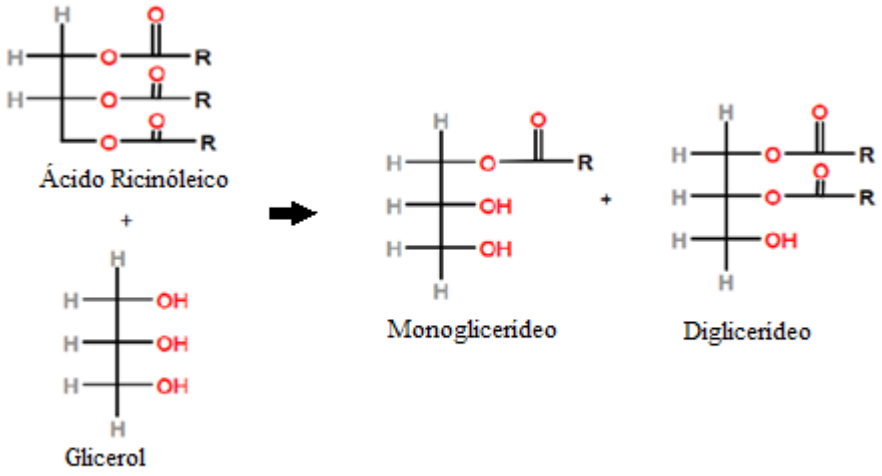
Figura 15 – Ácido ricinoléico e seus grupos reativos



Fonte: ARÉVALO-ALQUICHIRE;VARELO,2017

Por meio de reações de transesterificação com compostos polihidroxilados (glicerina, trimetilol propano, trietanol amina, dietanolamina), o teor de OH do óleo de mamona pode ser aumentado. A transesterificação com glicerina na proporção 1/1 molar, a 240°C, catalisada por 0,3% em peso de acetato de chumbo resulta em uma mistura (Figura 16), com teor de hidroxilas da ordem de 300 mg de OH/g (VILAR,2004)

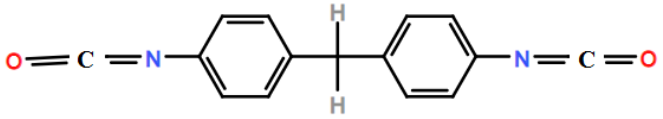
Figura 16– Transesterificação do óleo mamona com glicerina



Fonte: VILAR,2004

O difenilmetano di-isocianato (MDI) é o isocianato mais usados em adesivos de poliuretana por ser pouco volátil, apresentar menores custos de produção e apresentar maior reatividade devido a sua estrutura aromática (Figura 17), representando 75% dos isocianatos usados em adesivos (VILAR,2004).

Figura 17– Difenilmetado di-isocianto

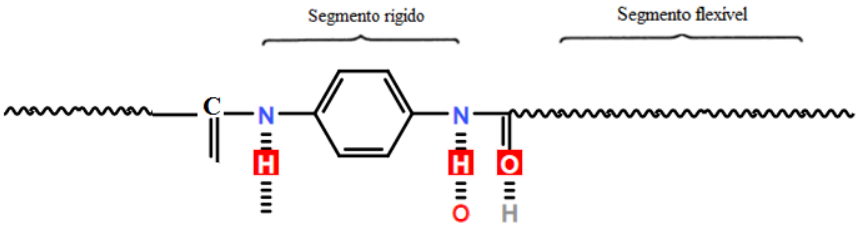


Fonte: ARÉVALO-ALQUICHIRE; VARELO,2017

Um excesso de isocianato leva à obtenção de filmes mais duros, enquanto um excesso de poliol resulta em adesivos de maior elasticidade. Como os grupos de uretano podem gerar

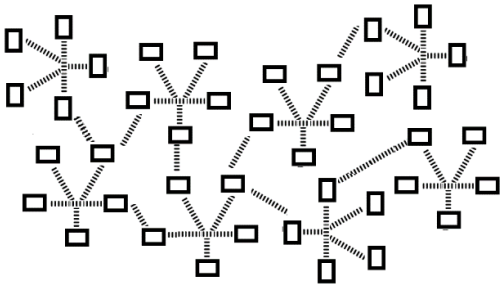
pontes de hidrogênio entre si (“crosslinking”), eles formam o chamado segmento rígido da PU e o resto da cadeia de poliol é o chamado de segmento flexível (ARÉVALO-ALQUICHIRE; VARELO,2017) (Figura 18 e Figura 19).

Figura 18– Seguimento rígido e flexível da Poliuretana



Fonte: IONESCU, 2005

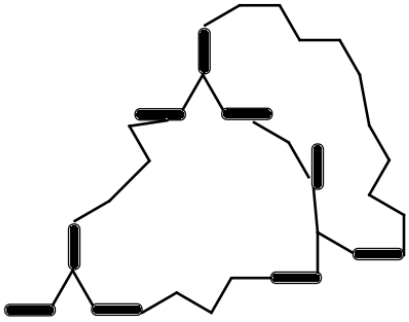
Figura 19 – Crosslinking entre os grupos rígidos da Poliurenata



Fonte: IONESCU, 2005

A coesão dos adesivos de PU é dependente da densidade de ligações cruzadas e a proporção isocianato/poliol tem influência determinante na densidade dessas ligações (VILAR, 2004). Ligações cruzadas são ligações entre moléculas lineares produzindo polímeros tridimensionais com alta massa molar, processo conhecido como reticulação polimérica. (Figura 20).

Figura 20– Estrutura reticulada da poliuretana



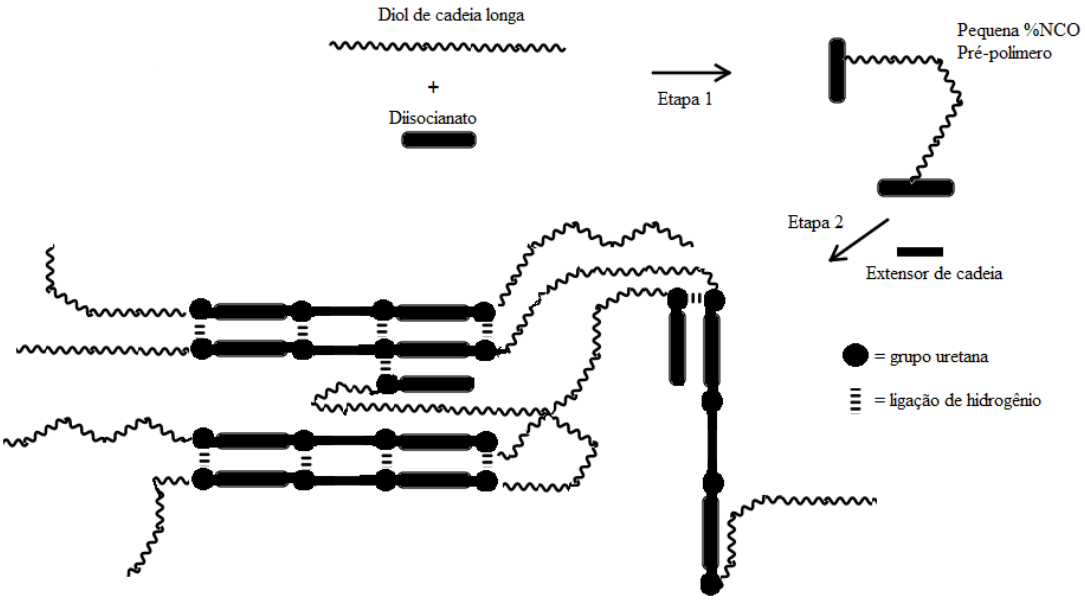
Fonte: PEREIRA,2010

As resistências às altas temperaturas, água, solventes, plastificantes, óleos e gorduras, aumentam com o teor de ligações cruzadas, por isso as características mais marcantes dos sistemas de poliuretanas com excesso de isocianatos são adesão, resistência a abrasão, dureza e resistência química a solventes. O MDI polimérico de alta viscosidade tem como aplicação a formação de espumas rígidas de poliuretana, poliisocianatos e espumas resistentes ao fogo para construção (VILAR, 2004).

As PUs podem ser obtidas por processos em uma etapa, no qual todas as matérias primas são misturadas simultaneamente ou processos em duas etapas (técnica do pré-polímero), na qual se faz a reação prévia de um poliol de alto peso molecular, com excesso de isocianato (MDI bruto) formando um pré-polímero com terminação NCO. Os pré-polímeros são geralmente líquidos viscosos, fabricados em batelada em reatores agitados. Inicialmente, faz-se a adição a frio do diisocianato e do poliol, em proporções previamente determinadas para a obtenção do teor de NCO livre desejado (DODGE,2003; VILAR,2004).

Através de uma reação entre o pré-polímero e extensores de cadeia, que são polióis de baixo peso molecular (etileno glicol, dietileno glicol ou 1,4 butano diol) uma poliuretana com alto peso molecular é formada (DODGE,2003; VILAR,2004) Figura 21:

Figura 21– Método do pré-polímero



Fonte: DODGE,2003

Os grupos NCO livres reagem com a umidade atmosférica promovendo a cura da resina. Isocianatos curados com umidade são comumente usados em revestimentos, adesivos, selantes e aglutinantes. A reação NCO – H_2O libera CO_2, portanto, a aplicação da resina deve permitir a liberação desse gás. A liberação do dióxido de carbono é mais difícil em aplicações nas quais a seção transversal do polímero necessita de maior espessura, o gás pode ser absorvido pela matriz polimérica e provocar a formações de bolhas (DODGE,2003).

A maioria dos polímeros utilizados na produção de compósitos é derivada de petroquímicos, um recurso não renovável, que apresenta em sua composição diversos tipos de Compostos Orgânicos Voláteis, que são substâncias tóxicas, cancerígenas e mutagênica (INTERNATIONAL AGENCY FOR RESERCH ON CANCER, 2004).

As resinas à base de formaldeído são convencionalmente usadas como aglutinante na formulação de painéis de partículas. As resinas comumente utilizadas são a Uréia-Formaldeído (UF), Melamina-Formaldeído (MF) e Fenol-Formaldeído (PF) (RIVELA et al., 2006). A resina Uréia-formaldeído é o aglutinante mais utilizado em placas não expostas à umidade, por ser mais barato e fácil de usar, também devido a sua não inflamabilidade, boas propriedades térmicas e sua dureza, além de ser curado formando um filme transparente (PIZZI; MITTAL,2017).

A liberação de formaldeído de painéis aglomerados com a resina Uréia-Formaldeído é em decorrência de dois processos: a) formaldeído livre presente na placa (não reagido) e b) formaldeído formado por hidrólise da ligação aminoplástica como resultado de altas temperatura e umidade relativa. O primeiro tipo de liberação dura apenas um curto período de tempo após a fabricação do aglomerado, porém, o segundo tipo de liberação pode continuar ao longo de toda a vida útil do produto. O formaldeído liberado é altamente reativo e combina-se facilmente com as proteínas do corpo humano (PIZZI; MITTAL,2017; ROWEL,2005)

Desde o final dos anos 80, organizações europeias que reivindicam práticas mais ecológicas e sustentáveis para o setor da construção civil, clamam por normas que limitem a emissão de formaldeído nos materiais à base de madeira (SOLT et al. 2019).

Recentemente, a Agência Europeia de Produtos Químicos (ECHA), na edição de 2016 do regulamento de Classificação, Rotulagem e Embalagem (CLP), classificou o formaldeído como um composto cancerígeno de categoria 1B (carcinogênico humano presumido, mutagênico ou teratogênico, com base em estudos em animais). No Japão e Estados Unidos, o

teor de emissão de formaldeído permitido pelas legislações locais tem sido continuamente reduzido ao logo do tempo (SOLT et al. 2019).

No início dos anos 70, quando o MDI polimérico provou ser eficaz para a fabricação de painéis de partículas, um mercado significativo nasceu. Aglomerantes de madeira de isocianato são usados principalmente para a produção de OSB ("Oriented Strand Board"), no entanto, eles também podem ser usados para outros materiais, como MDP ("Medium Density Particleboard") e MDF (Medium Density Fiberboard) (PIZZI; MITTAL,2017).

Contraditoriamente, os ligantes de madeira de isocianato também são baseados em formaldeído, sua preparação começa com a condensação do formaldeído. Porém, embora os adesivos de MDI polimérico sejam derivados desse composto orgânico, eles se diferenciam dos outros aglutinantes por não apresentarem uma emissão significativa de formaldeído (PIZZI; MITTAL,2017).

Wechsler et al. (2013) compararam a emissão de formaldeído entre um painel produzido com a resina UF convencional e dois painéis produzidos com a resina bi-componente derivada do óleo de mamona. O resultado de emissão para os dois painéis de partículas confeccionados com a resina derivada de mamona foi de 0,1 mg / 100 g, em comparação com 8 mg /100 g para o aglomerado confeccionado com a ureia-formaldeído. Destacam que painéis de partículas comerciais (MDP) são relatados como tendo emissões de UF de 2–3 mg / 100 g e painéis de fibra de média densidade (MDF) como tendo emissões de 7,5 mg / 100 g.

Devido à crescente demanda por bens de consumo, espera-se que o mercado global de bioadesivos cresça a uma taxa de 10% ao ano durante o período de 2019 a 2024, atingindo um mercado de aproximadamente 9,1 bilhões de dólares (ARIAS et al.2020).

Essa tendência é aumentada pelo esgotamento das matérias primas de origem petroquímica, ou seja, os recursos petroquímicos não são renováveis. Dessa forma, a longo prazo, a indústria de petróleo não fornecerá matéria-prima suficiente a custos economicamente viáveis. Aproximadamente 7% do consumo mundial de petróleo e gás natural é destinado à fabricação de polímeros, o que contribui para que ocorra o aumento do interesse global no desenvolvimento de resinas de base biológica. (MATHIAS; GREDIA; MICHAUD,2016;) ZHANG et. al. 2017).

Resinas de base biológica são polímeros naturais que atuam como adesivos. Biomassas como proteínas de soja e milho, taninos, amidos, bio-glicerol e lignina Kraft / Organosolv, são exemplos de matérias-primas com potencial para a produção de compostos adesivos (ARIAS et al. 2020).

Silva et al. (2013), analisando o ciclo de vida de painéis MDP produzidos no Brasil concluíram que a resina ureia-formaldeído foi o principal insumo material de fontes não renováveis e contribuiu com: a) 97% dos impactos ambientais negativos para a categoria de toxicidade humana - principalmente como resultado das emissões de formaldeído livre durante processo de manufatura do MDP; b) 33% dos impactos para a categoria eutrofização - devido à emissão de NOx para o ar e hidrocarbonetos para água, que ocorrem na produção de metanol e ureia utilizados para produzir a resina; b) 30% para a depleção dos recursos abióticos - causados pela produção de metanol e ureia, uma vez que se utiliza gás natural e carvão mineral em seus processos de produção; c) 22,5% para o aquecimento global – também devido a produção industrial de metanol e ureia.; d)17% oxidação fotoquímica - relacionado à emissão de CH4, CO,NOx e VOCs na produção de metanol e ureia; e) 11% para a categoria acidificação - devido à produção de metanol e ureia.

Piekarski et al. (2017) realizaram um estudo de caso da produção de painéis de MDF no Brasil, utilizando como ferramenta a Análise de Ciclo de Vida. Devido a origem fóssil da resina e os lançamentos de formaldeído livre para o ar durante a sua reação de cura em altas temperaturas; durante a fabricação da resina e a partir de formaldeído residual no adesivo, identificou o consumo da UF como um dos principais “hotspots” ambientais, especialmente em termos de impactos em toxicidade humana.

Piekarski et al. (2017) destacaram que a tecnologia utilizada no processo produtivo brasileiro é consistente com a fabricação do painel MDF a um nível global. Portanto, os resultados de seu estudo podem ser estendidos para a melhoria do desempenho ambiental das indústrias de painéis derivados de madeira em outros países.

Yang e Resentrarter (2019) conduziram um estudo de Análise do Ciclo Vida (ACV) de um bio-glicerol, produzido como sub-produto em uma planta de biodiesel, comparando com um petro-glicerol originado de uma refinaria de petróleo nos Estados Unidos. O bio-glicerol apresentou menor impacto ambiental em todas as categorias de impacto (aquecimento global, acidificação, eutrofização, destruição do ozônio, geração de material particulado e toxicidade). Os impactos ambientais do bioadesivo foram por volta de 30% menor em comparação com o processo de produção do adesivo derivado de petroquímicos

Gavioli (2020) avaliou os potenciais impactos ambientais causados por painéis confeccionados com a resina ureia formaldeído, comparando esses impactos com painéis produzidos com a resina poliuretana de mamona. O resíduo utilizado para a confecção do MDP

foi o bagaço de cana de açúcar e foi definido que sua utilização seria para vedação interna de ambientes, em condições secas e não estruturais. Até o momento, foi o único trabalho encontrado que conduziu uma análise ambiental por ACV, comparando os impactos entre essas duas resinas. Os resultados para as 18 categorias de impacto estudadas, são apresentados na Tabela 2:

Tabela 2– Comparação entre painéis MDF de bagaço de cana de açúcar e resinas UF e PU

Categorias de Impacto	Unidade	Painel UF	Painel PU
Mudanças climáticas	Kg CO_2-Equiv.	**249,0**	**153,8**
Esgotamento de recursos fósseis	Kg petróleo – Eq.	**125,0**	**41,9**
Toxicidade humana	Kg 1,4-DB- Eq.	**28,7**	**22,6**
Radiação Ionizante	Kg U235-Eq.	**8,9**	**18,7**
Depleção de metais	Kg Fe-Eq.	**17,5**	**9,6**
Depleção de ozônio	Kg CFC-11-Eq.	**$3,7E^{-05}$**	**$1,7^{-}E^{05}$**
Formação de particulados	Kg PM10 –Eq.	**0,640**	**0,606**
Formação de oxidantes químicos	Kg NMVOC	**1,83**	**1,95**
Ocupação de solo agrícola	m^2	**41,5**	**41,2**
Transformação de solo natural	m^2	**0,109**	**0,096**
Ocupação de solo urbano	m^2	**2,02**	**1,40**
Acidificação terrestre	Kg SO^2-Eq.	**2,38**	**2,48**
Ecotoxicidade terrestre	Kg 1,4-DB-Eq.	**0,087**	**0,083**
Ecotoxicidade em água doce	Kg 1,4-DB-Eq.	**0,421**	**0,209**
Eutrofização em água doce	Kg P – Eq.	**0,003**	**0,018**
Ecotoxicidade marinha	Kg 1,4 –DB Eq.	**0,291**	**0,084**
Eutrofização marinha	Kg N-Eq.	**0,267**	**0,652**
Esgotamento de água	m^3	**1330**	**2318**

Fonte: GAVIOLI (2020)

Uma alternativa de material que apresenta menor impacto ambiental e riscos à saúde é a poliuretana à base de óleo de mamona. Esse polímero possui elevada estabilidade física e química, que promove o encapsulamento da carga, impedindo que esta sofra deterioração, seja lixiviada ou solubilizada (CHAHUD,2007).

Apesar do MDI também fazer parte da composição da resina poliuretana e ser derivado de petroquímicos, por volta de 40% a 70% da resina de mamona, dependendo da sua utilização,

tem como origem o óleo extraído da semente da planta “Ricinus Comunnis”, ou seja, o óleo de mamona é um componente de base biológica (bio-poliol). Produto de base biológica é definido como um produto industrial, composto no todo ou em parte significativa de materiais biológicos, agrícolas renováveis ou florestais.

A planta de mamona é abundante no Brasil e a extração do óleo de mamona é simples, sendo que até um pequeno produtor rural pode explorar esse importante insumo agroindustrial, gerando emprego e renda para o setor (RODRIGUES,2008). Além disso, o fato da mamona não ser um produto alimentício, a torna amplamente aceitável como matéria-prima para aplicações em escala industrial (ZHANG et. al. 2017).

3.6.2 O uso de fibras vegetais para reforço em compósitos

Embora todas as fibras sejam de natureza celulósica, as diferentes fibras apresentam morfologia variada, que de certa forma conferem diferentes propriedades aos compósitos. A celulose da madeira é a fibra natural mais utilizada na preparação de compósitos poliméricos. No entanto, fibras vegetais oriundas de bagaço de cana, bananeira, coco, curuauá, casca de arroz, juta, sisal tem sido pesquisadas. A celulose é o componente principal de todas as fibras vegetais e a principal responsável pela sua resistência mecânica.

As fibras podem ser contínuas ou descontínuas, alinhadas ou com distribuição aleatória. Os compósitos reforçados por fibras contínuas constituem os de melhor performance mecânica, pois apresentam propriedades mecânicas ortotrópicas (dependem da direção que são observadas), enquanto que as de fibras descontínuas apresentam comportamento isotrópico (mesmo em todas as direções) (HYER,1998). As fibras contínuas apresentam alta resistência e rigidez em sua direção, no entanto, baixo desempenho na direção transversal das mesmas, que serão controladas pelas propriedades da matriz do compósito. Para carregamentos biaxiais, são geralmente utilizados compósitos laminados, formados pela união de várias lâminas com diferentes orientações.

Os compósitos de fibras descontínuas tem como vantagem a facilidade no processamento e o carregamento na fibra é em função do seu comprimento, já que os extremos das fibras são pontos concentrados de tensões. A interface fibra e matriz é a principal responsável pela transferência da solicitação mecânica da matriz para o reforço (SILVA, 2013).

As vantagens da utilização das fibras naturais em comparação às fibras sintéticas se devem principalmente a sua rápida renovação, baixo custo, não apresentam toxicidade, são

menos abrasivas e são biodegradáveis. As desvantagens são a falta de uniformidade de suas propriedades (origem das fibras, região de plantio, habilidade manual durante a colheita) e alta absorção de umidade. Os principais componentes químicos das fibras vegetais são substâncias polares, tais como celulose, hemicelulose e lignina (RODRIGUES, 2008).

Na Tabela 3 são apresentadas as características das fibras de juta, sisal, coco e café (MOHANTY; MISRA; DRZAL, 2000; BLEDZKI; GASSAN, 1999; MATIELLO, 2005; SARTORI,2012).

Tabela 3– Características das fibras de juta, sisal, coco e casca de café

Fibras	**Diâmetro (µm)**	**Densidade (g/cm^3)**	**Celulose %**	**Hemicelulose %**	**Lignina %**
Juta	200	1,3	61-71,5	13,6-20,4	12-13
Sisal	50-300	1,45	67-78	10-14,2	8-11
Coco	100-450	1,15-1,45	36-43	0,15-0,25	41-45
Café (casca+polpa)	20	0,125	25,90	26,60	17,48
Café (Pergaminho)	20	0,09	41,20	34,77	21,49

As matrizes termorrígidas, como a poliuretano, apresentam um grande potencial para a utilização das fibras vegetais, pois pode-se utilizar métodos de processamento bastante simples e de baixo custo como a moldagem por compressão (SILVA,2003).

As fibras de sisal e juta são fibras com percentuais altos de celulose, sendo indicadas para uso como material de reforço em compósitos. Os percentuais de lignina elevados nas fibras de juta e sisal habilitam-nas a terem comportamento adicional de fortalecimento das ligações internas dos compósitos, principalmente daqueles submetidos aos processos de aquecimento (PASSOS,2005). As fibras das cascas de coco têm percentual menor de celulose, entretanto, a quantidade de lignina é muito grande, cerca de duas a quatro vezes os valores para juta e o sisal.

O Brasil é o maior produtor de fibras de sisal e a cultura do sisal, uma das fibras mais utilizadas mundialmente, é de extrema importância sócio-econômica para o Brasil, por ser a única economicamente viável na região semi-árida do Nordeste. O uso de fibras de coco em compósitos possibilita o aproveitamento desse resíduo gerado após o consumo da água de coco. Os principais produtores são os estados de Alagoas, Sergipe e Bahia. A juta é hoje uma das

principais atividades econômicas das populações ribeirinhas da região amazônica e o seu cultivo em rotação de culturas enriquece a fertilidade do solo.

3.7 MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO NÃO CONVENCIONAIS CONFECCIONADOS COM RESÍDUOS SÓLIDOS

Como visto, os compósitos podem ser obtidos a partir da incorporação de resíduos em sua composição. Algumas pesquisas já obtiveram resultados satisfatórios ao incorporar resíduos sólidos para a confecção de um novo produto.

Wiedman (2002), desenvolveu um processo de produção para a fabricação de peças de mobiliário e telhas de cobertura a partir de compósito com fibra extraída do fruto de coqueiro combinada com a resina poliuretana.

Nascimento (2003) analisou as propriedades mecânicas de compósitos produzidos a partir da utilização de resíduos de espécies de madeira do nordeste e da resina vegetal de mamona. O material desenvolvido teve aplicação recomendada como elemento de vedação vertical e horizontal na construção civil.

Silva (2003) caracterizou compósitos formados pela resina poliuretano de mamona e fibras de sisal e coco. As fibras foram utilizadas em diferentes formas, como fibras curtas, fibras longas, tecido e fios contínuos. Os resultados mostraram que o desempenho dos compósitos com fibras de coco foi inferior aos compósitos com fibras de sisal. As fibras longas de sisal apresentaram o melhor efeito de reforçamento.

Silva (2006) avaliou a viabilidade técnica do emprego de partículas longas e orientadas de bagaço de cana de açúcar na confecção de painéis OSB e demonstrou a viabilidade de produção dos painéis, cujas propriedades atenderam os requisitos da normatização EM-300/200.O autor concluiu que a resina poliuretana a base de mamona são compatíveis com o resíduo para a produção de painéis de partículas.

Chahud (2007) produziu painéis de partículas de madeira a partir de resíduos de podas de árvores urbanas tendo como adesivo a resina poliuretana bicomponente de mamona e avaliou seu desempenho. Os resultados evidenciaram a viabilidade técnica de sua produção de acordo com os requisitos normativos da NBR 14810 (2006).

Rodrigues (2008) utilizou a resina como adesivo para a aglomeração de partículas obtidas pelo processamento de pneus inservíveis. O objetivo era desenvolver uma tecnologia para

atenuação do impacto provocado por esse passivo ambiental. Foram produzidos, nesse trabalho, placas de amortecimento sonoro e de revestimento de pisos para edificações.

Quirino (2010) produziu painéis com fibras de açaí (*Euterpe Precatória*) utilizando a resina bicomponente de mamona, com a proporção em massa da resina em 15% e na composição de 1:1 (poliol/pré-polímero).Os resultados demonstram um potencial de utilização do compósito para a fabricação de móveis, revestimento de parede e forros.

Bertolini (2011) analisou a viabilidade de produção de chapas de partículas empregando resíduos de *Pinus sp* tratado com preservante e resina poliuretana à base de mamona. Os resultados apontaram que as propriedades físicas e mecânicas foram satisfatórias e com médias superiores ao estipulado pela normalização brasileira.

Fiorelli et al. (2011) estudou o potencial de aplicação do bagaço de cana de açúcar para a fabricação de painéis de partículas aglomeradas, utilizando a resina bicomponente de mamona e concluíram que a mesma se mostrou eficiente como matriz polimérica para fabricação desse compósito.

Sartori et al. (2012) desenvolveu um painel em madeira de reflorestamento e chapas de partículas de bagaço de cana de açúcar e afirmou que a resina poliuretana à base de óleo de mamona mostra-se como alternativa eficiente para produção de painéis de partículas à base desse resíduo em substituição a uréia-formaldeído empregada atualmente.

Ferreira (2013) caracterizou a utilização da casca de noz macadâmia na produção de painéis de partículas. Foi testado quatro composições de painéis de partículas, com 0%, 30% 60% e 100% de casca de noz macadâmia em massa de partículas. Concluiu-se que a adição de casca de noz macadâmia diminuiu a resistência mecânica dos painéis devido a sua alta densidade e geometria que dificultou a interação com o adesivo. A resina utilizada foi a ureia formaldeído.

Cravo et al. (2014) investigou as propriedades térmicas e o efeito da durabilidade nas propriedades mecânicas de um compósito à base de resíduos agrícolas para aplicação como forro em aviários. Foram utilizadas partículas de cascas de amendoim, fibra de coco (50:50) e 15% de resina poliuretana bi-componente à base de óleo de mamona. Os resultados relataram que o compósito apresenta potencial para aplicação como isolante térmico.

Baldan (2015) incorporou o agregado reciclado de poliuretana termofixa, oriundo da reciclagem do resíduo industrial de poliuretana à resina vegetal de mamona e às fibras de vidro. Obteve um compósito de matriz polimérica que obteve resultados satisfatórios quando comparados com materiais comumente aplicados na construção civil. Além disso, a resina

encapsulou e estabilizou o agregado reciclado, fazendo com que, o agregado reciclado passasse a ser classificado como classe II B – inerte.

Nascimento et al. (2016) investigou a resistência à abrasão de painéis de partículas fabricados com resíduos de madeira de Eucalyptus sp. para aplicação, na forma de pisos, em ambientes interiores. Foi utilizado dois tipos de adesivos na pesquisa, a poliuretana e a ureia formaldeído, e ambos conduziram a resultados equivalentes. Os resultados validaram a aplicação dos painéis de partículas homogêneas em áreas internas.

Mesquita,A. et. al. (2016) produziram painéis aglomerados de três camadas utilizando como adesivo a ureia formaldeído, partículas de eucalipto nas camadas externas e partículas de eucalipto combinadas às fibras de coco e sisal. Os teores de substituição da madeira pelas fibras foram de 10% e 20%, para os compósitos com os resíduos de coco, as propriedades físico-mecânicas foram muito semelhantes aos aglomerados produzidos apenas com eucalipto.

Wang and Hu (2016) confeccionaram compósitos com diferentes proporções de fibras de coco e fibras de caule de banana misturas com 14 % de resina fenol – formaldeído e parafina. As fibras do caule de banana aumentaram os valores de MOR e MOE e afetaram negativamente o parâmetro de adesão interna. O excelente desempenho do painel de partículas de fibras de coco e fibras de banana sugere que ele é adequado para materiais de construção de uso externo.

Ciannamea et al. (2017) produziram painéis com a resina fenol formaldeído e casca de arroz. Modificando os teores da resina e a pressão de processamento, verificaram que um aumento na pressão e na porcentagem em massa da resina melhorou as propriedades mecânicas do compósito. O compósito atendeu a normalização americana ANSI A.208.1 e destacam que os painéis valorizam um resíduo natural, que pode ser aplicado em forros ou divisórias apenas controlando as condições de processamento.

Martins et al. (2018) avaliaram a utilização da vagem de soja na produção de painéis aglomerados de baixa densidade em conjunto com as espécies de madeira de *Eucalyptus urophyll*, *Eucalyptus grandis*, a resina ureia formaldeído e parafina. A substituição do resíduo de soja pela madeira ocorreu nas proporções de 0%, 25%, 50%, 75% e 100%. Concluíram que os painéis produzidos com aproximadamente 23% de vagem da soja possuem viabilidade técnica de produção.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 MATERIAIS

4.1.1 Resíduo Casca de Café

O resíduo sólido do beneficiamento do café por via úmida (Figura 22) (casca + polpa) foi coletado de uma fazenda da região de Pedregulhos- SP. O resíduo do beneficiamento por via seca (Figura 23) (casca + polpa+ pergaminho) foi coletado em uma fazenda do município de São Carlos-SP.

Figura 22- Casca de café obtida por via úmida

Fonte: Acervo da autora

Figura 23- Casca de café obtida por via seca

Fonte: Acervo da autora

4.1.2 Resina Poliuretana Derivada do Óleo de Mamona

A resina poliuretana foi fornecida pela empresa Imperveg de Aguaí-SP. É constituída de dois componentes: de um poliol e um pré polímero (Figura 24). O poliol é sintetizado a partir do óleo de mamona e o pré-polímero é sintetizado a partir do difenilmetano diisocianato (MDI), sendo pré-polimerizado com um poliol também derivado do óleo de mamona.

Figura 24– Resina Poliuretana

Fonte: acervo da autora

4.1.3 Fibras vegetais

As fibras de juta e sisal foram fornecidas pela empresa Sisalsul de São Paulo-SP. A fibra de coco alongada foi fornecida pela empresa Escovas e Acessórios Industriais de Limeira-SP (Figura 25).

Figura 25 – Fibras vegetais moídas

Fonte: acervo da autora

4.2 MÉTODOS

O trabalho foi dividido em seis etapas principais experimentais: manufatura dos painéis de partículas com a resina poliureta , as fibras vegetais e o resíduo casca de café (via úmida e via seca); caracterização física e mecânica dos painéis produzidos; seleção da composição mais adequada de acordo com os requisitos estipulados pela norma ABNT NBR 14810- 2; modificação e adequação do processo de produção para a melhoria das propriedades mecânicas e físicas; ensaio de caracterização térmico e acústico e classificação ambiental dos resíduos sólidos segundo a ABNT NBR 10004 (2004).

4.2.1 Manufatura das placas

A produção das placas seguiu as seguintes etapas: a) secagem da casca de café obtida por via úmida; b) moagem dos resíduos e das fibras; c) adição da resina; d) formação do colchão; e) prensagem térmica e f) resfriamento do painel. Conforme ilustrado na Figura 26.

Figura 26– Processo de produção das placas

Fonte: acervo da autora

As cascas do beneficiamento do café por via úmida foram secas em estufa na temperatura de 100 ºC até que sua massa permaneceu constante. Em uma amostra de 4,2kg de resíduo, 3,12kg correspondeu a massa de água e 1,15kg a massa da casca, portanto a umidade foi calculada em U% = 271%, em base seca. As cascas do beneficiamento do café por via seca, não passaram por essa etapa.

Em seguida, as cascas originadas nos dois processos foram moídas, separadamente, assim como as fibras, em um moinho da marca MA 580, produzido pela empresa MARCONI

Equipamentos para Laboratórios que é composto por três facas internas para corte de plásticos e madeira. Após a moagem, as partículas passaram por uma caracterização granulométrica.

Foram confeccionados 24 painéis (30cm x 25cm x 1cm), sendo 3 de cada tipologia, em um total de 8 composições diferentes (Tabela 4).

Tabela 4– Composição das chapas de partículas

-	Tipologia	Resina (g) Poliol/ Pré Polímero Proporção Componente	Densidade Nominal (g/cm^3)	Proporção Resíduo/Fibra/Resina
T1	casca via úmida	2:1	0,90	73% / 0% / 26%
T2	casca via seca	2:1	0,90	73% / 0% / 26%
T3	casca via úmida + sisal	2:1	0,76	43% / 25% / 31%
T4	casca via seca + sisal	2:1	0,76	43% / 25% / 31%
T5	casca via úmida + juta	2:1	0,76	43% / 25% / 31%
T6	casca via seca + juta	2:1	0,76	43% / 25% / 31%
T7	casca via úmida + coco	2:1	0,76	43% / 25% / 31%
T8	casca via + coco	2:1	0,76	43% / 25% / 31%

Como visto na Tabela 3, com exceção da Tipologia 1, todos os outros painéis foram confeccionados com a mesma composição em massa. O objetivo, nessa primeira fase da pesquisa, era de analisar a influência do tipo de fibra nas propriedades físicas e mecânicas do material e escolher a fibra com o melhor desempenho. A escolha dessa composição para o painel levado em consideração alguns aspectos:

- A resina compôs 31% em massa do painel. Os painéis aglomerados geralmente são fabricados com um teor de resina que corresponde de 6% a 15% de sua composição, porém a mistura da resina com as partículas foi realizada de forma manual e uma quantidade maior de resina foi utilizada para tentar garantir que todas as partículas entrassem em contato com esse adesivo, já que o processo manual pode dificultar a interação entre os materiais. Além disso, essa proporção é utilizada para resinas já consolidadas comercialmente.

- As fibras foram distribuídas de forma manual, aleatória e são do tipo descontínuas. Apesar das fibras contínuas apresentarem melhor desempenho mecânico, as fibras descontínuas facilitam o processamento.

- A resina poliureta é uma resina bi-componente, formada pela mistura de um poliol com função catalisadora e um pré-polímero. Sua formulação ocorreu a partir da mistura a frio do pré-polímero e do poliol, nas proporções de 1:2, ou seja, para cada uma parte de pré-polímero, foi adicionada duas de poliol. O pré-polímero foi acrescido ao poliol, e manualmente agitado durante 3 minutos, a temperatura ambiente.

Na etapa de prensagem térmica do material, a mistura formada pela resina, pelas partículas do resíduo casca de café e pelas fibras naturais moídas, foi submetida à pressão de 2,4MPa e a temperatura de 50ºC pelo tempo de 15 minutos. Todas as tipologias passaram por esse mesmo processamento. Os parâmetros de operação da prensa foram baseados na pesquisa desenvolvida por Baldan (2015) que utilizou o mesmo equipamento dessa pesquisa.

Os painéis foram confeccionados no Laboratório de Construção Civil do Instituto de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São Paulo-IAU/USP.

4.2.2 Ensaios de caracterização

Para o estudo do comportamento das chapas de partículas, foram realizados os ensaios físicos de granulometria e teor de umidade e mecânicos do módulo de elasticidade e módulo de ruptura na flexão estática. Esses ensaios foram repetidos para todas as tipologias desenvolvidas.

4.2.3 Seleção da composição mais adequada

A norma brasileira ABNT NBR 14810-2 (2013) – "Painéis de partículas de média densidade: requisitos e métodos de ensaio" estabelece os requisitos necessários para os painéis de partículas de média densidade de acordo com a sua utilização. Os painéis são classificados em seis tipos: painéis não estruturais para usos em condições secas (P2); painéis não estruturais para uso em condições úmidas (P3), painéis estruturais para uso em condições secas (P4), painéis estruturais para uso em condições úmidas (P5), painéis estruturais para uso em condições severas de carga, em ambientes secos (P6) e painéis estruturais para usos em condições severas de carga, em ambientes úmidos (P7). A classificação é em função do atendimento aos requisitos físicos e mecânicos exigidos pela normalização para cada um desses usos.

Para o volume do painel desenvolvido e as massas utilizadas para sua composição, as chapas dessa pesquisa estariam classificadas, de acordo com sua densidade nominal, como sendo de média densidade (de 0,60g/cm^3 a 0,79g/cm^3). Com exceção das tipologias T1e T2. Por isso, a NBR 14810-2 (2013) foi utilizada como parâmetro. As composições T1 e T2 também foram comparadas com essa mesma norma, na medida que os usos desejados para esses painéis correspondem aos usos dos painéis de média densidade e ainda não existe norma brasileira que especifica critérios para os painéis de alta densidade.

Dentre as tipologias elaboradas na pesquisa, a composição que apresentou o melhor desempenho mecânico nos ensaio de flexão estática foi a tipologia escolhida para o prosseguimento dos estudos.

4.2.4 Modificação do processo de produção para a melhoria das propriedades mecânicas

A norma ABNT NBR 14810-2 (2013) estabelece que painéis não estruturais para uso em condições secas (P2), com espessura de 6 a 13mm, devem atender ao valor mínimo de 11MPa na resistência à flexão estática (MOR) e de 1800MPa para o módulo de elasticidade (MOE). Nenhuma das tipologias atenderam a esses requisitos, sendo que a composição T4-seca+sisal apresentou os maiores valores, com um MOR de 7,91MPa e um MOE de 500,02 MPa.

Por isso, novas composições foram testadas e foi realizado um planejamento fatorial fracionário (2^{4-1}) para verificar quais parâmetros operacionais (temperatura e pressão) influenciaram na diminuição ou no aumento das propriedades físicas e mecânicas de interesse. Também, foi estudado a influência da fibra de sisal nessas propriedades e a modificação na proporção da resina bicomponente utilizada. A fibra de sisal foi escolhida dentre as outras fibras pesquisadas, por ter apresentado um melhor resultado na primeira etapa da pesquisa. Porém, foram utilizadas fibras cortadas manualmente com cumprimentos maiores dos que os testados anteriormente.

Sabe-se que nos compósitos com fibras curtas as extremidades das fibras atuam como pontos de concentração de tensão e assim funcionam como regiões de iniciação de trincas. No ensaio de flexão, a resistência e o módulo de elasticidade são controlados pela resistência do material localizado na superfície do compósito. A trinca sempre se inicia na região trativa do corpo de prova e se propaga para o lado compressivo. Às vezes, fibras curtas podem atuar mais como defeito do que como reforço pelo maior número de extremidades inseridas na matriz do compósito (SILVA, 2003).

Além disso, para que o compósito se beneficie do nível máximo de resistência da fibra, o comprimento da fibra deve ser igual ou maior que o comprimento crítico (l_c), definido como o comprimento mínimo de fibra requerido para obter a maior resistência à fratura do compósito. O comprimento crítico é o mínimo necessário para que as tensões de aderência entre a fibra e a matriz se desenvolvam. Os compósitos dessa primeira fase da pesquisa, por terem sido confeccionados com fibras muito curtas, podem não ter sido beneficiados com o nível máximo de resistência das fibras.

Levando em consideração esses aspectos, as novas tipologias (Tabela 5), dos novos compósitos foram elaboradas com fibras longas (por volta de 5 cm – Figura 27). Para um maior aproveitamento do resíduo considerou-se, também, aumentar a sua proporção em relação a quantidade de fibras utilizadas em cada placa.

Tabela 5– Composição das novas tipologias das chapas de partículas

-	Tipologia	Resina (g) Poliol/Pré Polímero Proporção Componente	Densidade Nominal (g/cm^3)	Temperatura ºC	Pressão MPa	Proporção Resíduo/Fibra/Resina
T1[2]	casca via seca	1:1	0,76	50	1,2	68% / 0% / 31%
T2[2]	casca via seca	1:1,5	0,76	50	2,4	68% / 0% / 31%
T3[2]	casca via seca + sisal	1:1	0,76	50	2,4	64% / 0,04% / 31%
T4[2]	casca via seca + sisal	1:1,5	0,76	50	1,2	64% / 0,04% / 31%
T5[2]	casca via seca	1:1	0,76	100	2,4	68% / 0% / 31%
T6[2]	casca via seca	1:1,5	0,76	100	1,2	68% / 0% / 31%
T7[2]	casca via seca + sisal	1:1	0,76	100	1,2	64% / 0,04% / 31%
T8[2]	casca via seca+ sisal	1:1,5	0,76	100	2,4	64% / 0,04% / 31%

Figura 27– Fibra de sisal – tamanho aproximado de 5cm

Fonte : Acervo da autora

4.2.5 Ensaios de caracterização

Para essas novas tipologias confeccionadas foram realizados os seguintes ensaios: Módulo de Ruptura na Flexão Estática (MOR), Módulo de Elasticidade na flexão estática (MOE), tração perpendicular (Adesão interna), Densidade Aparente, Absorção de Água, obtenção do coeficiente de absorção sonora e de condutividade térmica.

Por fim, foi realizado experimentos para a classificação do resíduo sólido de acordo com a ABNT NBR 10004 (2004) – Resíduos Sólidos, Classificação – que classifica os resíduos sólidos quanto aos seus riscos potenciais ao meio ambiente e à saúde pública, para que possam ser gerenciados da maneira mais adequada.

5. RESULTADOS

5.1 CAPÍTULO 1- Avaliação física e mecânica dos painéis produzidos

5.1.1 Introdução

5.1.1.1 Compósitos confeccionados com resíduos sólidos do cultivo cafeeiro

Visando benefícios socioeconômicos e ambientais para países em desenvolvimento, o estudo alemão de Bekalo e Reinhardt (2010) investigou o desempenho mecânico e físico de aglomerados produzidos com subprodutos agrícolas do café, coletados na Etiópia, para o desenvolvimento de materiais de construção. Foi utilizado como matérias primas a casca de café obtida pela via seca (casca, polpa, pergaminho), o pergaminho obtido pelo processamento do grão de café por via úmida e partículas de madeira (*Picea abies*), além disso, foram testados três tipos de resina (pMDI: 8% - 12% em massa; uréia-formaldeído (UF): 15% em massa; fenol-melamina-ureia-formaldeído (PMUF):15% em massa). Uma grande variedade de painéis foi produzida mantendo a proporção de 50:50 entre a massa de partículas de madeira e os subprodutos agrícolas, pois em estudos preliminares os painéis confeccionados apenas com os resíduos apresentaram valores baixos de resistência à flexão (2,5-5,3 MPa) e baixos valores de adesão interna no ensaio de tração perpendicular (0,01–0,15 MPa). Ademais, os resíduos foram utilizados em sua forma natural, não sendo cortados ou moídos.

Grande parte dos painéis confeccionados neste estudo satisfizeram os requisitos europeu de MOR-Módulo de Ruptura na flexão e MOE-Módulo de Elasticidade na flexão (DIN EN 312, 2003) para usos gerais em condições secas: revestimentos, painéis e divisórias internas (P1: MOR=11,5Mpa) e para acessórios internos, incluindo a fabricação de móveis (P2: MOR =13MPa; MOE=1600MPa). Um aumento do teor de resina de 8 para 12% de pMDI resultou em uma melhoria substancial das propriedades mecânicas das placas de madeira e resíduos agrícolas. Os Módulos de Ruptura na flexão variaram de 11 a 17 MPa e a faixa de dados do Módulo de elasticidade variaram de 1866 a 2747 MPa. A única inconformidade foi o painel produzido com a resina PMUF, que não atendeu o requisito de uso P2 para o MOR.

Os dados de adesão interna variaram de 0,34 a 0,83 MPa. Todas as tipologias de painéis foram consideradas em conformidade com os parâmetros de adesão interna, cujos valores exigidos são de 0,24 MPa para placas de usos gerais (P1) e com exceção da tipologia confeccionada com a resina (PMUF), também atenderam ao requisito de 0,35MPa para acessórios internos (P2).

Mendes et al. (2010) avaliaram a influência da incorporação de casca de café nas propriedades físico-mecânicas de painéis aglomerados produzidos com *Eucalyptus urophylla* S.T. Blake. Os painéis foram produzidos com incorporação de 25%, 50% e 75% de casca de café, com teores de 6%,9% e 12% da resina fenol-formaldeído e 1% de parafina. As partículas de madeira e casca de café foram uniformizadas em moinho martelo na dimensão de 6mm. As condições operacionais da prensagem à quente foram de 180 º C, com pressão de 3,92 MPa e tempo de prensagem de 8 minutos. Os valores médios de MOR foram de 5,64MPa (25% de substituição), 3,79MPa (50%) e 1,94 MPa (75%); para o MOE foram de 789,25MPa (25%), 558,5 MPa (50%) e 327,75 MPa (70%). Os valores de adesão interna foram de 0,19 Mpa (6% em massa de resina); 0,22 Mpa (9%) e 0,25MPa (12%). Foi concluído no estudo que as propriedades mecânicas apresentam relação linear crescente com o aumento do teor de resina e decrescente com a porcentagem de incorporação de casca de café.

Araújo (2015) confeccionou um painel de partículas de três camadas com resíduos do processamento de bambu e cascas de café obtidas pela via seca. Partículas de bambu maiores que 1mm e menores do que 4mm foram utilizadas na camada interna, enquanto que partículas menores do que 1mm e maiores do que 0,25 mm foram utilizadas na camada externa. A casca de café, não triturada, foi utilizada em substituição ao bambu da camada interna, nas proporções de 10%,20% e 30% de substituição. Utilizou como adesivo a resina poliuretana à base de mamona na proporção de 1:2,5 de pré-pólimero e poliol, respectivamente; a quantidade de adesivo utilizada correspondeu a 10% da massa das partículas. As condições operacionais foram de 90ºC,10min e pressão de 4,5MPa. Os valores médios encontrados nos ensaios de flexão perpendicular para o MOR foram de 13,90 MPa (10% de substituição), 13,62 MPa (20%) e 11,33 MPa (30%); esses valores atendem a norma brasileira: ABNT NBR 14.810 (2013) (11MPa), a norma comercial canadense: CS 236/1966 (11,2 MPa), e a americana: ANSI A208.1-1999 (11MPa). Para o MOE foram de 2303,61 MPa (10%), 2162,79 MPa (20%) e 1888,87 MPa (30%), essas médias foram maiores que os valores especificados pela norma brasileira (1800MPa) e americana (1725 MPa), não atendendo a norma canadense (2450 MPa).

Para a adesão interna, no ensaio de tração perpendicular, conseguiu os resultados de 1,19 MPa,1,15 MPa ,0,89 MPa para essas mesmas proporções de casca de café, atendendo os requisitos dessas três normas (brasileira:0,45 MPa, canadense: 0,49 MPa, americana: 0,40 MPa). Os requisitos das normas especificados acima são para painéis para usos internos e em condições secas. A propriedade física de inchamento em espessura foi compatível com o requisito da normatização brasileira e todos os painéis ficaram abaixo dos 22% requeridos. Para

a absorção de água o valor variou de 30% a 35% e a normatização não apresenta uma especificação para esse ensaio.

Scatolino et al. (2017) utilizaram o pergaminho na produção de painéis particulados em conjunto com partículas de madeira de eucalipto. Foi estudado os teores de substituição de 0%,10%,30%, 40% e 50% das partículas de madeira pelo resíduo e o painel foi confeccionado com 8% da resina ureia-formaldeído, prensagem térmica de 4MPa, 160ºC e 15 minutos. A propriedade de absorção de água (24 h) variou de 109% a 140% e diminuiu com o aumento da porcentagem de pergaminho de café. O inchamento em espessura (24 h) não apresentou diferenças significativas com o aumento de resíduo de café, com valores aproximados de 13%. O Módulo de Elasticidade dos painéis variou de 646,49 até 402,03 MPa, enquanto o Módulo de Ruptura variou de 8,18 até 4,45 MPa e os valores para adesão interna variaram de 0,18MPa a 0,34MPa. Os maiores valores foram para os painéis com menores teores de substituição.

Esses foram os estudos encontrados que incorporaram resíduos agrícolas cafeeiros em compósitos e que posteriormente realizaram sua caracterização físico-mecânica, a seguir, destaca-se, também, alguns estudos recentes que utilizaram outros resíduos agrossilvopastoris e a resina poliuretana a base de mamona para a confecção de painéis como material alternativo para a indústria da construção civil.

Barbirato et al. (2018) apresentaram um estudo para a utilização de resíduos de madeira Balsa (*Ochroma pyramidale*) na produção de placas de fibra orientada (OSB) aglomeradas com a resina poliuretana de mamona. A madeira foi processada e obteve-se partículas com 9 cm de cumprimento, 2,5 cm de largura e 0,1 cm de espessura, as quais foram misturadas à resina bi componente na proporção de 1:1 (teores de 11% e 15% em massa) e posteriormente levadas a uma prensa hidráulica por 10 min, 100 ºC e a uma pressão de 50kg/m^2. Os painéis OSB produzidos com densidade de 400 kg/m^3 e 15% de resina apresentaram melhores propriedades mecânicas, MOR= 12,86 MPa, MOE= 3505 MPa, Adesão Interna=0,46MPa, em comparação com os outros tratamentos avaliados de menor densidade ou menor teor de resina. Essa tipologia apresentou o resultado de 33% no ensaio de inchamento em espessura (24h).

Fiorelli et al. (2018) produziram três tipologias de painéis de partículas multicamadas de baixa densidade com as camadas externas de bagaço de cana de açúcar e a camada interna variando entre bagaço de cana e duas fibras vegetais da Amazônia: curauá e juta; e as condições operacionais de 5MPa, 100 ºC e 10 min. A resina utilizada foi o adesivo de poliuretano bi componente de óleo de mamona na proporção de 1: 1. As partículas do bagaço de cana de

açúcar de 1 a 4 mm foram utilizadas na produção da camada interna e partículas de 0,3 a 0,6 mm foram usadas nas camadas externas. As fibras de juta e curauá foram cortadas manualmente nas dimensões de 4cm a 5cm e adicionadas na camada interna na proporção de 20% da massa da partícula. A quantidade de resina usada para a camada interna foi de 12% em massa e 15% para as camadas externas. As tipologias confeccionadas com as fibras não apresentaram diferenças significativas entre elas para o MOE (1438 MPa e 1566 MPa) e para a adesão interna (0,35 MPa e 0,29 MPa), para o MOR o painel com juta apresentou um melhor resultado de 16 MPa. O painel produzido apenas com o bagaço obteve um maior valor de adesão interna (0,92MPa) e um menor valor para o MOE (1104 MPa). Para o aumento da adesão interna dos painéis com as fibras, foi sugerido um aumento da porcentagem em massa da resina, apesar de destacar a menor viabilidade econômica do painel com o aumento do teor de resina. Para as propriedades físicas os valores variaram de 27,9 % a 34,8 % para a absorção de água (2h) e de 4,8% a 6,7% para o inchamento em espessura (2h). Os menores valores foram obtidos pelo painel produzido apenas com o bagaço.

Bertolini et al. (2019) produziram painéis de alta densidade com resíduos de *Pinus sp* tratados com um preservante de madeira a base de cromo, cobre e boro (CCB) e a resina poliuretana derivada do óleo de mamona. Através de um planejamento fatorial, foram confeccionadas oito tipologias variando o tempo de prensagem, a quantidade de partículas de madeira (1300g/1400g) e a porcentagem em massa da resina 1:1 (12% - 15%). Os resultados para o inchamento em espessura (24h) variaram de 9,11% a 11,06%; os de absorção de água (24h) variaram de 12,66% a 20,96% e para a adesão interna variaram de 1,22MPa a 1,71MPa. Os resultados mostraram que um aumento no teor das partículas de madeira diminuiu o inchaço em espessura e a absorção de água. O aumento na fração de massa da resina também resultou em reduções no inchaço da espessura. A propriedade de adesão interna aumentou em 13,8% com um aumento de 25% na fração de massa da resina.

Fiorelli, Bueno e Cabral (2019) produziram painéis de partículas de três camadas com a resina poliuretana de mamona e com os resíduos agroindustriais fibras de coco (camada interna) e bagaço de cana de açúcar (camadas externas). Variando a densidade do painel, 500 kg/m^3 e 700 kg/m^3, utilizando as condições operacionais de 5MPa, 100 ºC e 10 min e a resina na proporção de 1:1 nas quantidades de 12% em massa para a camada interna e 15% em massa para a camada externa, obtiveram os resultados variando de 40,22% a 50,56% e 13,86% a 23,08% para as propriedades físicas de absorção de água (24h) e inchamento (24h), respectivamente. O painel de maior densidade apresentou os maiores valores nas propriedades

físicas, assim como os maiores valores nas propriedades mecânicas, que foram de MOR = 16,20 MPa, MOE=1879 e Adesão Interna = 0,35 MPa. Para o painel de menor densidade obtiveram os valores iguais a MOR= 5,89 MPa, MOE = 650 MPa e Adesão Interna = 0,20 MPa.

Gavioli (2020) produziu duas tipologias de painéis de média densidade com a resina bi componente de mamona na proporção de 1:1,5 (pré-polímero/poliol) e com a sua composição de 12% em massa. Uma das tipologias dos painéis foi confeccionada somente com o bagaço de cana de açúcar e a resina (T2), a segunda tipologia foi produzida com bagaço de cana de açúcar, madeira de eucalipto e a resina (T4). As condições operacionais aplicadas foram de temperatura de 100ºC, pressão de 5MPa e tempo de 10min. A composição elaborada somente com o resíduo apresentou os melhores resultados na flexão (MOE = 2163MPa, MOR=23,64MPa) comparada com a tipologia T4 (MOE = 1107MPa, MOR=9,54MPa). Para a adesão interna o painel T2 apresentou o resultado de 0,63MPa e o compósito T4 de 0,66MPa, os valores do parâmetro físico de inchamento foi de 17,7% e 21,1%, respectivamente.

5.1.2 Metodologia: Parte 1 - Avaliação da influência do tipo de fibra vegetal utilizada: juta, sisal e coco nas propriedades físicas (granulometria, teor de umidade) e mecânica (flexão estática) dos painéis produzidos

5.1.2.1 Módulo de elasticidade e Módulo de ruptura na flexão estática

O módulo de elasticidade ou módulo de Young está relacionado com a rigidez do material, quanto maior for o valor do módulo, maior será a rigidez do painel, ou seja, para um material mais rígido é necessária uma maior tensão aplicada para que se obtenha a mesma deformação de um material mais flexível. É medido pela razão entre a tensão e a deformação relativa, dentro do limite elástico (linear), em que a deformação é totalmente reversível e proporcional a tensão. O módulo de ruptura fornece o valor da força máxima executada durante o ensaio de tensão, é um dado importante pois determina a tensão máxima na qual um polímero pode se submeter sem que sofra a deformação plástica (irreversível). Para a determinação do módulo de ruptura (MOR) e módulo de elasticidade (MOE), é realizado o ensaio de flexão estática, em três apoios, em máquina universal de ensaios mecânicos (EMIC). São utilizados para o ensaio dez corpos de prova de dimensões de 250mm x 50mm como preconiza a NBR 14810-2 (Figura 28).

Figura 28– Ensaio de flexão estática

Fonte : Acervo da autora

O MOR e o MOE são determinados pelas Equações 1 e 2:

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

Onde:

MOR = módulo de ruptura, em Mpa;

P = Carga de ruptura, em N;

D = distância entre apoios do aparelho, em mm;

B = largura do CP, em mm;

E = espessura, em mm.

$$MOE = \frac{(P1 * D^3)}{d * 4 * B * E^3} \quad (2)$$

Onde:

MOE = módulo de elasticidade, em Mpa;

P1 = força no limite proporcional, em N;

D = distância entre apoios do aparelho, em mm;

d = deflexão , expressa em mm, corresponde à força P1

B = largura do CP, em mm;

E = espessura, em mm

Essa etapa da pesquisa foi desenvolvida no Laboratório de Madeiras e Estrutura de Madeiras (LAMEM) da EESC/USP.

5.1.2.2 Teor de umidade

Para esse ensaio, os painéis foram pesados e suas massas aferidas, em seguida, as chapas foram colocadas em estufa e foi realizada pesagens até que as massas dos painéis permaneceram constantes. Considera-se que a massa constante foi obtida quando os resultados de duas operações subsequentes de pesagem não diferiram em mais de 0,1%. Para o cálculo da porcentagem do teor de umidade, utiliza-se a Equação 3.

$$U = \frac{MU - MS}{MS} * 100 \ (3)$$

Onde,

U = teor de umidade, expresso em %

MU = massa úmida, expressa em g

MS = massa seca, expressa em g

5.1.2.3 Granulometria

O ensaio granulométrico consiste em colocar uma amostra de material em um conjunto das peneiras, que estão dispostas em ordem decrescente de tamanho, e agitadas com o auxílio do agitador mecânico. A massa do material retido em cada peneira é pesada assim como a massa retida no fundo.

5.1.3 Resultados e Discussões: Parte 1 - Avaliação da influência do tipo de fibra vegetal utilizada: juta, sisal e coco nas propriedades físicas (granulometria, teor de umidade) e mecânica (flexão estática) dos painéis produzidos

5.1.3.1 Análise granulométrica

A análise granulométrica envolve a determinação de três parâmetros relativos às partículas: composição granulométrica, diâmetro máximo característico e módulo de finura. A dimensão máxima característica é especificada pelo diâmetro da peneira onde 5% ou menos das partículas ficam retidas, o módulo de finura é tanto maior quanto maior a partícula. O resultado dos ensaios granulométricos está expresso nas Tabelas 6,7,8,9 e 10.

Tabela 6– Granulometria da casca de café por via seca

Peneira	**M1 = 300g**		**M2 = 300g**		**Médias**	
# (mm)	**M. Retida**	**% Retida**	**M. Retida**	**% Retida**	**% Retida**	**% R. Ac.**
9.5	0,0	0,0%	0,0	0,0%	0%	0%
6.3	0,0	0,0%	0,0	0,0%	0%	0%
4.75	0,0	0,0%	0,0	0,0%	0%	0%
2.36	0,6	0,2%	0,6	0,2%	0%	0%
1.18	108,1	36,2%	111,9	37,3%	37%	37%
0.6	111,5	37,3%	111,4	37,1%	37%	74%
0.3	44,5	14,9%	42,9	14,3%	15%	89%
0.15	15,9	5,3%	15,3	5,1%	5%	94%
Fundo	18,2	6,1%	17,9	6,0%	6%	100%
Soma	**298,8**	**100,0%**	**300,0**	**100,0%**	**100%**	**394%**
				Diâmetro máximo característico:	**2,36mm**	
				Módulo de finura:	**2,94mm**	

Tabela 7– Granulometria da casca de café por via úmida

Peneira	**M1 = 300g**		**M2 = 300g**		**Médias**	
# (mm)	**M. Retida**	**% Retida**	**M. Retida**	**% Retida**	**% Retida**	**% R. Ac.**
9.5	0,0	0,0%	0,0	0,0%	0%	0%
6.3	0,0	0,0%	0,0	0,0%	0%	0%
4.75	0,0	0,0%	0,0	0,0%	0%	0%
2.36	0,0	0,0%	0,0	0,0%	0%	0%
1.18	66,7	22,2%	68,8	22,9%	23%	23%
0.6	114,9	38,3%	115,3	38,4%	38%	61%
0.3	69,2	23,1%	69,8	22,9%	23%	84%
0.15	26,4	8,8%	25,8	8,6%	9%	93%
Fundo	22,7	7,6%	21,3	7,1%	7%	100%
Soma	**299,9**	**100,0%**	**300,0**	**100,0%**	**100%**	**360%**
				Diâmetro máximo característico:	**2,36mm**	
				Módulo de finura:	**2,60mm**	

Tabela 8– Granulometria da fibra de coco

Peneira	M1 = 300g		M2 = 300g		Médias	
# (mm)	M. Retida	% Retida	M. Retida	% Retida	% Retida	% R. Ac.
9.5	0,0	0,0%	0,0	0,0%	0%	0%
6.3	0,0	0,0%	0,0	0,0%	0%	0%
4.75	0,0	0,0%	0,0	0,0%	0%	0%
2.36	0,0	0,0%	0,0	0,0%	0%	0%
1.18	0,9	0,3%	0,6	0,2%	0%	0%
0.6	16,9	5,6%	18,2	6,1%	6%	6%
0.3	174,7	58,3%	184,9	61,8%	60%	66%
0.15	81,4	27,2%	72,5	24,2%	26%	92%
Fundo	25,8	8,6%	23,2	7,7%	8%	100%
Soma	**299,9**	**100,0%**	**300,0**	**100,0%**	**100%**	**264%**
				Diâmetro máximo característico:	**1,18mm**	
				Módulo de finura:	**1,64mm**	

Tabela 9– Granulometria da fibra de juta

Peneira	M1 = 150g		M2 = 150g		Médias	
# (mm)	M. Retida	% Retida	M. Retida	% Retida	% Retida	% R. Ac.
9.5	0,0	0,0%	0,0	0,0%	0%	0%
6.3	0,0	0,0%	0,0	0,0%	0%	0%
4.75	0,0	0,0%	0,0	0,0%	0%	0%
2.36	0,0	0,0%	0,0	0,0%	0%	0%
1.18	0,0	0,0%	0,0	0,0%	0%	0%
0.6	21,5	14,5%	15,0	10,1%	0%	12%
0.3	59,5	40,1%	57,4	38,5%	12%	52%
0.15	37,5	25,3%	40,8	27,4%	26%	78%
Fundo	29,7	20%	35,9	24,1%	22%	100%
Soma	**148,2**	**100,0%**	**149,1**	**100,0%**	**100%**	**242%**
				Diâmetro máximo característico:	**1,18mm**	
				Módulo de finura:	**1,42mm**	

Tabela 10– Granulometria da fibra de sisal

Peneira	M1 = 200g		M2 = 200g		Médias	
# (mm)	M. Retida	% Retida	M. Retida	% Retida	% Retida	% R. Ac.
9.5	0,0	0,0%	0,0	0,0%	0%	0%
6.3	0,0	0,0%	0,0	0,0%	0%	0%
4.75	0,0	0,0%	0,0	0,0%	0%	0%
2.36	0,0	0,0%	0,0	0,0%	0%	0%
1.18	2,5	1,3%	2,5	1,3%	1%	1%
0.6	43,4	21,7%	43,4	21,7%	22%	23%
0.3	86,2	43,2%	86,2	43,2%	43%	66%
0.15	48,6	24,3%	48,6	24,3%	24%	90%
Fundo	19,0	9,5%	19,0	9,5%	10%	100%
Soma	**148,2**	**100,0%**	**199,7**	**100,0%**	**100%**	**281%**
				Diâmetro máximo característico:	**1,18mm**	
				Módulo de finura:	**1,81mm**	

As fibras curtas usualmente são definidas como sendo aquelas que possuem um comprimento inferior a 100 vezes o comprimento do seu diâmetro equivalente. Para as fibras de juta, se o comprimento das fibras for menor que 20mm, a fibra é considerada curta. Para as fibras de sisal, o comprimento deve ser inferior a 5mm. Para as fibras de coco, o comprimento deve ser inferior a 10mm e para as fibras de café inferior a 2mm. Pela análise granulométrica foi possível verificar que todas as fibras foram classificadas como fibras curtas.

5.1.3.2 Teor de umidade

A Tabela 11 apresenta os valores médios, em porcentagem, do Teor de Umidade das placas.

Tabela 11- Teor de Umidade das placas

-	Teor de Umidade (%)
T1	4,66
T2	7,30
T3	5,12
T4	6,17
T5	4,72
T6	5,35
T7	4,86
T8	6,12

T1:úmida, T2:seca, T3:úmida+sisal, T4:seca+sisal, T5:úmida+juta, T6:sec+juta, T7: úmida + coco, T8: seca+coco

Analisando os dados acima, é possível concluir que as chapas elaboradas com os resíduos obtidos por via úmida apresentaram um teor de umidade menor do que as chapas confeccionadas com as cascas obtidas por via seca. Isso pode ser explicado pelo fato de que as cascas de via úmida passaram pelo processo de secagem em estufa e as de via seca não passaram por esse processo.

A norma ABNT NBR 14810-2 estabelece que os painéis devem atender a um teor de umidade de 5% a 13%. As tipologias T1-úmida+sem fibras, T5- úmida+ juta e T7- úmida + coco apresentaram um teor de umidade um pouco menor do que 5%. Todas as outras tipologias atenderam ao requisito da norma.

5.1.3.3 Flexão estática: MOE e MOR

A Tabela 12 apresenta os valores médios de MOR e MOE obtidos no ensaio de flexão estática para as chapas de partículas confeccionadas com a casca de café obtida por via úmida.

Tabela 12 – Valores médio de MOR e MOE para as chapas de via úmida

-	T1	T3	T5	T7
MOR (MPa)	3,21	5,73	5,43	3,90
MOE (Mpa)	196,04	316,83	245,28	175,23

T1:úmida,T3:úmida+sisal, T5:úmida+juta, T7: úmida + coco

Foi analisado se existe diferença significativa na resistência das placas confeccionadas com a casca de via úmida e os diferentes tratamentos com as fibras. Foi feita a aplicação da Análise

one-way de Variância (one-way ANOVA). Pois, temos amostras provenientes de vários grupos independentes e uma variável numérica de interesse, e tem-se como objetivo verificar se o valor médio da variável é diferente nos diferentes grupos. Foi utilizado o programa estatístico PAST, por ser gratuito e fácil de usar, com interface similar ao programa Excel.

Para verificar se os dados eram normalmente distribuídos foi realizado o teste de Anderson-Darling e foi realizado o teste de Levene para verificar se a variância de cada grupo era a mesma. Sendo essas as premissas exigidas para a realização da ANOVA, na qual foram satisfeitas.

Para o módulo de ruptura, existiu diferenças significativas em pelo menos uma das médias dentre os tratamentos aplicados, por isso, foi realizado um teste de comparação post-hoc de Tukey para indicar qual grupo variou mais ou menos. Com esse teste, concluiu-se que os grupos T1 – sem fibras e T7 – fibras de coco apresentaram uma média menor do que os outros grupos. Para os grupos T3 – sisal e T5 – juta não existiram diferenças significativas entre eles e suas propriedades foram melhores se comparadas com o tratamento sem a fibras e com o tratamento com as fibras de coco.

Para o módulo de elasticidade, a mesma análise estatística foi realizada e pela ANOVA, verificou-se que existem diferenças significativas em pelo menos uma das médias dentre os tratamentos aplicados. No teste de análise post-hoc concluiu-se que os tratamentos T1-sem fibras e T7-coco apresentaram as menores médias entres os grupos e são estatisticamente iguais. O tratamento T5-sisal apresentou média maior que o tratamento T7-juta(Figuras 29 e 30)

Figura 29 –MOR via úmida

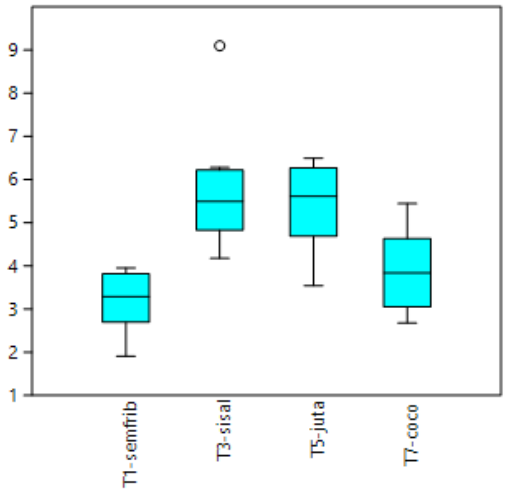
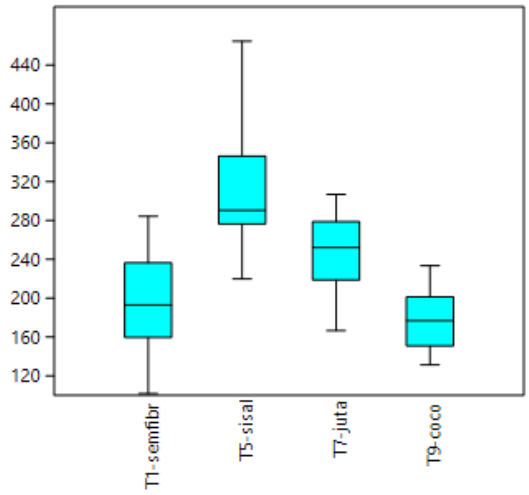


Figura 30– MOE via úmida



A Tabela 13 apresenta os valores médios de MOR e MOE obtidos no ensaio de flexão estática para as chapas de partículas confeccionadas com a casca de café obtida por via seca.

Tabela 13– Valores médio de MOR e MOE para as chapas de via seca

-	T2	T4	T6	T8
MOR (MPa)	5,041	7,91	6,40	7,17
MOE (Mpa)	484,89	500,02	359,235	384,91

T2:seca, T4:seca+sisal, T6:sec+juta, T8: seca+coco

Realizando a mesma análise estatística descrita anteriormente, concluiu-se que para o módulo de ruptura existiu diferenças significativas em pelo menos uma das médias dentre os tratamentos aplicados. Na análise post-hoc, foi concluído que a chapa T2-sem fibras apresentou a menor média e é estatisticamente diferente das outras composições. A composição T4- sisal apresentou média maior que a composição T6-juta. E a composição T8-coco não apresentou diferenças significativas comparadas com a composição T6-juta.

Para o módulo de elasticidade, os resultados também foram estatisticamente diferentes e foi concluído que os tratamentos T2-sem fibras foi estatisticamente igual ao tratamento T4-

sisal. Sendo suas médias maiores que os tratamentos T6-juta e T8-coco, que também são estatisticamente iguais entre si (Figuras 31 e 32).

Figura 31 – MOR via seca

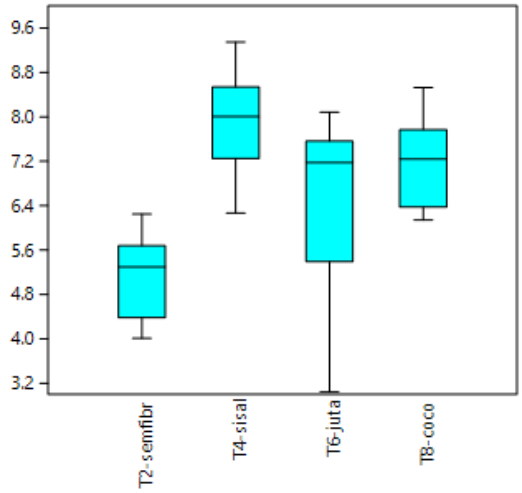
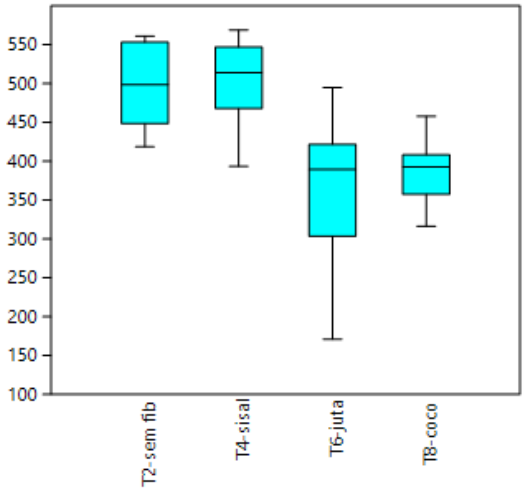


Figura 32– MOE via seca



Ademais, foi realizada uma comparação dos valores de MOR e MOE entre chapas confeccionadas pelas cascas obtidas por via úmida e por via seca. Para isso, foi realizado um Teste “t” de Student, pois temos amostras provenientes de apenas dois grupos independentes.

Tanto para o MOR quanto para o MOE, os dados apresentaram diferenças significativas sendo que as chapas confeccionadas com a casca de via seca apresentaram melhor desempenho mecânico na flexão. A média para o valor de resistência na via seca foi igual a 6,63MPa, enquanto o valor na via úmida foi de 4,57MPa. Para o módulo de elasticidade, o valor da via seca foi de 434,77MPa, enquanto que o valor na via úmida foi de 233,34MPa.

As diferenças nas propriedades mecânicas na flexão entre as chapas confeccionadas com as cascas das duas origens, pode ser explicada pelas diferenças em suas composições. A casca obtida por via seca tem o pergaminho como constituinte, enquanto que a casca obtida por via úmida é composta apenas pela casca e pela polpa. Em pesquisa realizada por Brum (2007), o pergaminho apresentou um teor de celulose de 41,20%, enquanto que a polpa apresentou um teor de 25,90%. A celulose tem grande influência nas propriedades mecânicas dos compósitos, o que explica o melhor desempenho das chapas confeccionadas com o resíduo obtido por via seca.

Além disso, em sua pesquisa, também foi analisado o grau de cristalinidade do pergaminho e da polpa. O pergaminho apresentou o dobro do índice de cristalinidade da polpa, sendo esses de 51,8% e 25,53%, respectivamente. As regiões cristalinas são responsáveis por uma maior resistência mecânica dos materiais. Destaca-se, também, a decomposição que as cadeias de carbono da casca obtida por via úmida devem ter sofrido, nos montes da fazenda, antes de sua coleta e secagem em estufa (Figuras 33 e 34).

Figura 33- MOR

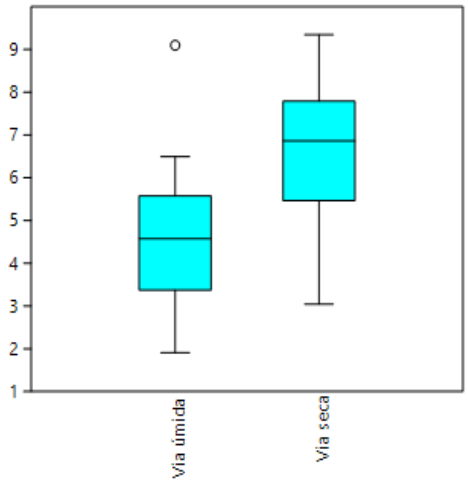
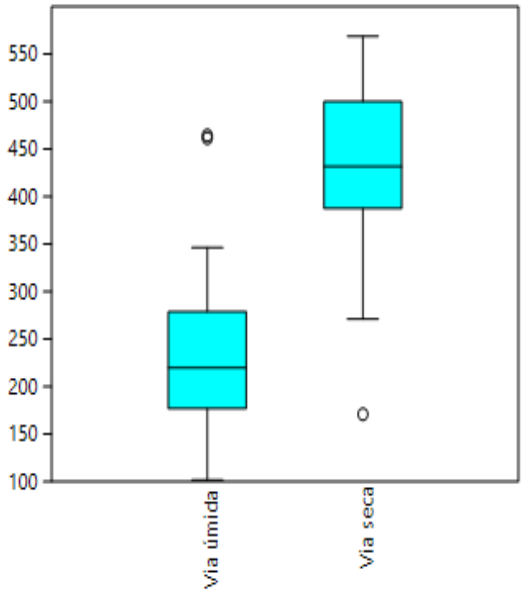


Figura 34 – MOE



Dentre as fibras utilizadas para o reforço dos compósitos, a fibra de coco foi a que apresentou os piores resultados na flexão. Para as chapas de via úmida, os resultados se compararam com as chapas confeccionadas sem nenhuma fibra para reforço. Para as chapas de via seca, apesar das fibras de coco terem incrementado o valor do módulo de ruptura, ela afetou negativamente o módulo de elasticidade. A fibra de sisal apresentou os melhores resultados. Para os compósitos de via úmida, ela incrementou as propriedades mecânicas na flexão mais do que as outras fibras, assim como ocorreu com o módulo de ruptura para os compósitos de via seca. Para o módulo de elasticidade, ela não causou o incremento da propriedade, porém, não o afetou negativamente, como aconteceu com as outras duas fibras.

5.2.4 Metodologia – Parte 2: Efeito das variáveis de produção (pressão, temperatura, composição da resina, presença de fibra de sisal) nas propriedades físicas e mecânicas dos compósitos produzidos com a casca de café obtida pela via seca.

5.2.4.1 Módulo de elasticidade e Módulo de ruptura na flexão estática

Esses ensaios foram efetuados seguindo a mesma metodologia do item 5.1.2.1.

5.2.4.2 Tração perpendicular

O ensaio de tração tem como objetivo avaliar a capacidade adesiva da placa, verificando o comportamento estrutural do compósito. Nesse ensaio, a amostra do material (corpo de prova) é submetida a um esforço longitudinal. A partir das medidas de cargas e os respectivos alongamentos, constrói-se a curva tensão-deformação. A máquina de tração é hidráulica, movida pela pressão de óleo e está ligada a um dinamômetro que mede a força aplicada ao corpo de prova (Figura 35). As especificações para esse ensaio também são ditadas pela norma brasileira ABNT NBR 14810-2.São necessários dez corpos de prova com as dimensões de 50mm x 50mm.

Figura 35 – Ensaio de tração perpendicular

Fonte : Acervo da autora

A resistência à tração perpendicular é dada pela Equação 4.

$$TP = \frac{P}{S} \quad (4)$$

Onde,

TP = resistência a tração perpendicular em N/mm^2

P = carga de ruptura em N

S = b1 x b2, onde b1 e b2 são as dimensões dos corpos de prova em mm

Essa etapa da pesquisa também foi desenvolvida no Laboratório de Madeiras e Estrutura de Madeiras (LAMEM) da EESC/USP.

5.2.2.3 Inchamento em espessura

Os dados dessa característica são fundamentais porque o inchamento das placas em espessura provoca danos ao produto, comprometendo sua durabilidade e causando prejuízo à finalidade. Conforme requisitos apontados pela norma brasileira NBR 14810-2 (2013), para sua caracterização, foram realizadas verificações após 24 horas de imersão em água (Figura 36).

Figura 36– Imersão dos corpos de provas em água por 24h

Fonte : Acervo da autora

O inchamento em espessura foi determinado pela Equação 5.

$$I = \frac{E1 - Eo}{Eo} * 100 \ (5)$$

Onde,

I = inchamento em espessura do CP (%)

E1 =espessura do CP após o período de imersão, em mm

Eo =espessura do CP antes da imersão, em mm.

Essa etapa da pesquisa também foi realizada no Laboratório de Construção Civil (LCC) do IAU/USP.

5.2.2.4 Planejamento Fatorial

O planejamento fatorial é uma metodologia para a condução sistematizada de experimentos e representa uma economia de tempo, recursos materiais e financeiros. Com o objetivo de melhorar as propriedades de interesse, identifica as melhores condições das variáveis de trabalho, permitindo a otimização do processo produtivo do compósito. Foi realizado um planejamento fatorial fracionário (2^{4-1}), Tabela 14, verificando os efeitos da pressão, temperatura, proporção da resina bi componente e presença ou ausência de fibra de sisal nas propriedades mecânicas (Módulo de Elasticidade, Módulo de Ruptura e Adesão Interna – Tração Perpendicular) e física (Inchamento em espessura) no painel produzido. Essas quatro propriedades foram escolhidas para a análise por estarem especificadas na norma brasileira ABNT NBR 14810-2 (2013): "Painéis de partículas de média densidade: requisitos e métodos de ensaio. A análise estatística dos efeitos das variáveis de produção nas propriedades do compósito foi realizada com a ajuda do software Excel e Past. As 8 tipologias fabricadas estão apresentadas na Figura 37.

Tabela 14- Combinações de variáveis usadas na fabricação dos compósitos

Tipologia do Compósito	Resina Bicomponente (1:1 ou 1:1,5) (Pré-polímero/Poliol)	Fibra (g)	Temperatura (oC)	Pressão (MPa)
T1[2]	90g/90g	0g	50	1,2
T2[2]	72g /108g	0g	50	2,4
T3[2]	90g/90g	25g	50	2,4
T4[2]	72g /108g	25g	50	1,2
T5[2]	90g/ 90g	0g	100	2,4
T6[2]	72g/180g	0g	100	1,2
T7[2]	90g /90g	25g	100	1,2
T8[2]	72g/108g	25g	100	2,4

Figura 37 – Tipologias confeccionadas

5.2.2.5 Densidade e Absorção de Água

Para esse ensaio, dez corpos de prova de dimensões 50mm x50 mm, foram extraídos de cada painel. As massas de cada corpo de prova foram aferidas, assim como suas dimensões para o cálculo do volume. A partir desses resultados, é possível calcular a densidade de cada corpo de prova através da Equação 6.

$$D = \frac{M}{V} * 1000000 \ (6)$$

Onde,

D: densidade em Kg/m^3;

M: massa em g;

V: volume em mm^3

O ensaio de absorção de água indica se as placas podem ser empregadas em condições de umidade severa ou ambientes mais amenos. Para essa avaliação, foram realizados ensaios gravimétricos, por meio de um acompanhamento da evolução das massas das amostras em 24 horas. Para o ensaio de absorção de água, utilizou-se 10 corpos de prova nas dimensões 25 x 25 x 9 mm, água destilada e uma balança analítica. A absorção de água foi determinada pela Equação 7.

$$A = \frac{M1 - Mo}{Mo} * 100 \ (7)$$

Onde,

A=absorção de água (%);

M1=peso do CP após período de imersão, em g;

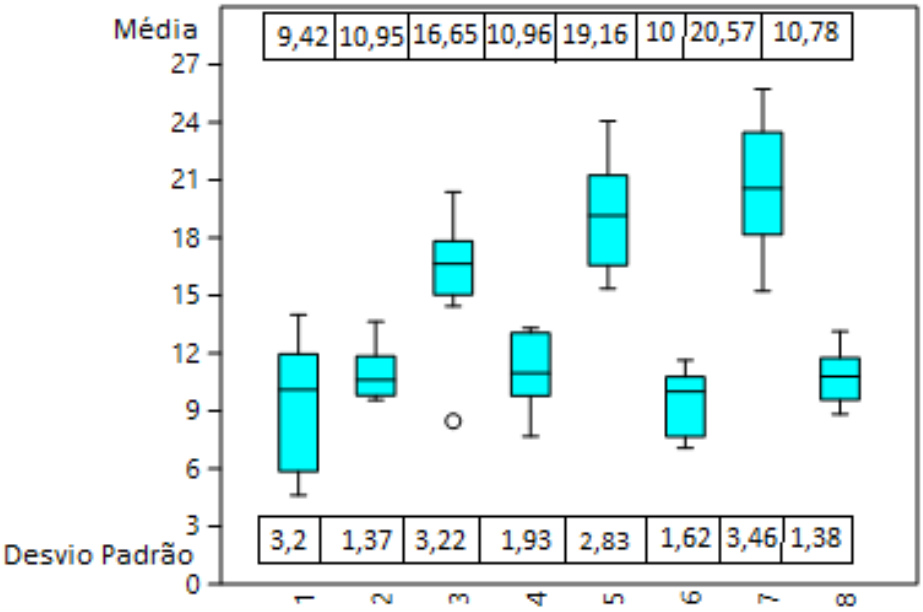
Mo= peso do CP antes da imersão, em g.

5.2.5 Resultados e Discussões– Parte 2: Efeito das variáveis de produção (pressão, temperatura, composição da resina, presença de fibra de sisal) nas propriedades físicas e mecânicas dos compósitos produzidos com a casca de café obtida pela via seca.

5.2.5.1 Influência dos parâmetros operacionais na Flexão estática: MOR

Os resultados médios obtidos para o Módulo de Ruptura na Flexão Estática pelos 10 corpos de provas de cada tipologia produzida estão apresentados na Figura 38.

Figura 38 – Resultados para o MOR: Box-Plot e Médias (MPa)



Pela Figura 38, verifica-se que as tipologias T5[2](1:1, sem fibra,100ºC,2,4MPa) e T7[2] (1:1, com fibra, 100ºC,1,2MPa) apresentaram os melhores resultados para o Módulo de Ruptura na Flexão Estática e através da Análise one-way ANOVA (95% de confiança) e um teste pós-hoc de Tukey, verificou-se que suas médias são estatisticamente iguais. A tipologia T3[2] (1:1, com fibra,50 ºC,2,4 MPa) também apresentou um alto valor, sendo estatisticamente igual a tipologia T5[2](1:1, sem fibra,100ºC,2,4MPa), porém, seu valor é estatisticamente menor que a tipologia T7[2](1:1, com fibra, 100ºC,1,2MPa).

Na Figura 39, observa-se a porcentagem de influência de cada parâmetro operacional nessa propriedade de flexão e na Figura 40 é possível observar se um nível maior ou menor da variável operacional melhorou ou prejudicou a propriedade de interesse, assim como a interação entre duas variáveis diferentes. No planejamento fatorial realizado, foi estipulado como nível superior (+) a condição de maior temperatura, maior pressão, presença de fibra de sisal e proporção de resina igual a 1:1,5 e como nível inferior (-) foi definido a condição de menor temperatura, menor pressão, ausência de fibra e proporção da resina igual a 1:1.

Figura 39- Resultado da influência dos parâmetros operacionais no MOR

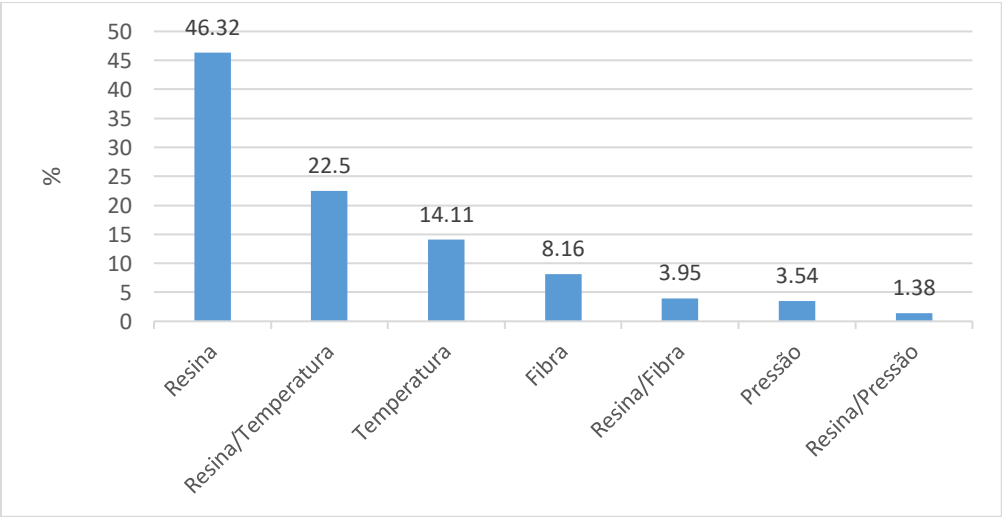
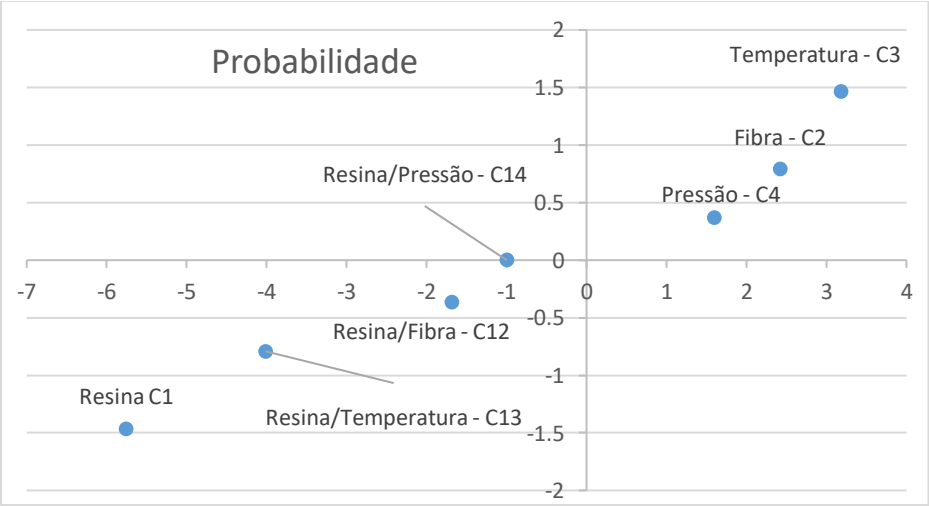


Figura 40– Gráfico de probabilidade



Pela Figura 39 é possível verificar que a diferença na composição da resina foi o parâmetro que mais influenciou no MOR (46,32%), juntamente com a interação entre essa variável e a variável temperatura (22,4%). Juntas, a composição da resina, a interação entre resina e temperatura e a temperatura, tiveram um efeito de 82,93% no Módulo de Ruptura na flexão estática. A presença da fibra de sisal, teve uma pequena influência no valor final da propriedade (8,16%). Pela Figura 40, nota-se que a composição da resina teve um incremente negativo na propriedade, isso significa que o nível da resina estabelecido como positivo (+ = 1:1,5) prejudicou o compósito, já para a temperatura, um nível maior (+ =100ºC), melhorou a propriedade, assim como a presença da fibra. A interação entre temperatura e resina apresentou um decréscimo no valor de MOR. Conclui-se, portanto, que para o MOR as condições operacionais de maior temperatura, composição da resina de 1:1 e a presença da fibra de sisal aumentam o valor dessa propriedade.

A norma brasileira estabelece que painéis não estruturais para uso interno e em condições secas (P2), com espessura de 6 a 13mm, devem atender ao valor mínimo de 11MPa na resistência à flexão estática. Das 8 tipologias confeccionadas, as tipologias $T3^2$, $T5^2$ e $T7^2$ foram as que atenderam esse requisito da norma.

A diferença na proporção dos componentes da resina contribuiu significativamente para o resultado obtido no ensaio. A resina na proporção de 1:1,5 apresenta maiores cadeias de polióis, o que provoca a diminuição da polaridade da matriz polimérica, além da diminuição do número de ligações cruzadas, que são as responsáveis pela coesão do adesivo (VILAR, 2004). Dessa forma, essa proporção de resina diminuiu a resistência mecânica do painel. A diminuição da polaridade da matriz polimérica, provoca uma menor interação interfacial entre a matriz, as partículas e as fibras (região onde a fibra e a resina são química e mecanicamente combinadas), que são materiais polares (PAUL et al. 2008). A interface fibra e matriz é a principal responsável pela transferência da solicitação mecânica da matriz para o reforço (SILVA, 2013).

Além disso, a temperatura e a interação entre essa variável e a composição da resina também apresentaram forte influência no resultado. Segundo Vilar (2004), os segmentos flexíveis (polióis) geralmente são incompatíveis com os segmentos rígidos e polares, como consequência, ocorre uma separação de fases (segregação) e os blocos rígidos ficam dispersos nos blocos flexíveis. Para uma quantidade maior de polióis adicionados, maior será essa dispersão dos grupos uretanos, o que pode provocar a diminuição da resistência mecânica, na medida que as interações entre as cadeias, principalmente as ligações hidrogênio entre os

segmentos rígidos (ligações cruzadas), contribuem para a elevação das propriedades mecânicas das poliuretanas.

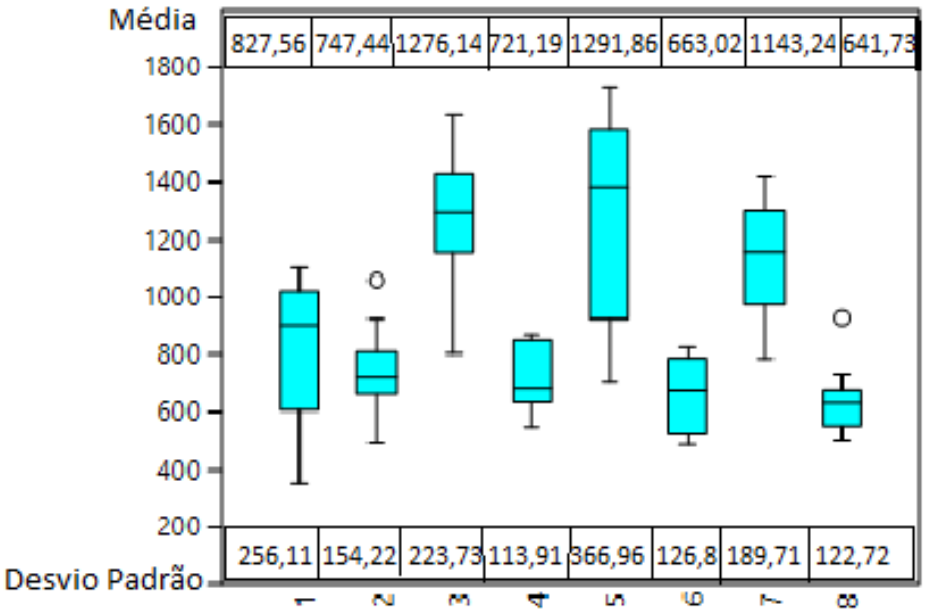
Com o incremento da temperatura e o fornecimento de energia no processamento do compósito, essas pontes de hidrogênio iniciais são rompidas e outras energeticamente mais favoráveis são formadas na direção da tensão aplicada, a tensão é mais distribuída e esse efeito contribui com o aumento da resistência à deformação permanente (plástica) e o aumento da tensão de ruptura (VILAR, 2004).

No ensaio de flexão estática, uma carga crescente é aplicada ao compósito e provoca uma deformação nas suas camadas mais externas. Defeitos como poros, bolhas ou ranhuras se tornam pontos de concentração de tensões e provocam a propagação de trincas em materiais frágeis como esses compósitos, a fibra de sisal pode ter permitido que essas microfissuras tenham sido distribuídas ao longo do material, dispersando os danos subcríticos através do corpo de prova (ANDERSON,2005). Alguns trabalhos também reportaram o incremento do módulo de ruptura de painéis lignocelulósicos com a adição de fibras: Colli et al. (2010), Mesquita,A.et al., (2016),Fiorelli at al. (2018), os dois últimos autores apontaram que a geometria das fibras pode ter ajudado no preenchimento dos espaços vazios.

5.2.5.2 Influência dos parâmetros operacionais na Flexão estática: MOE

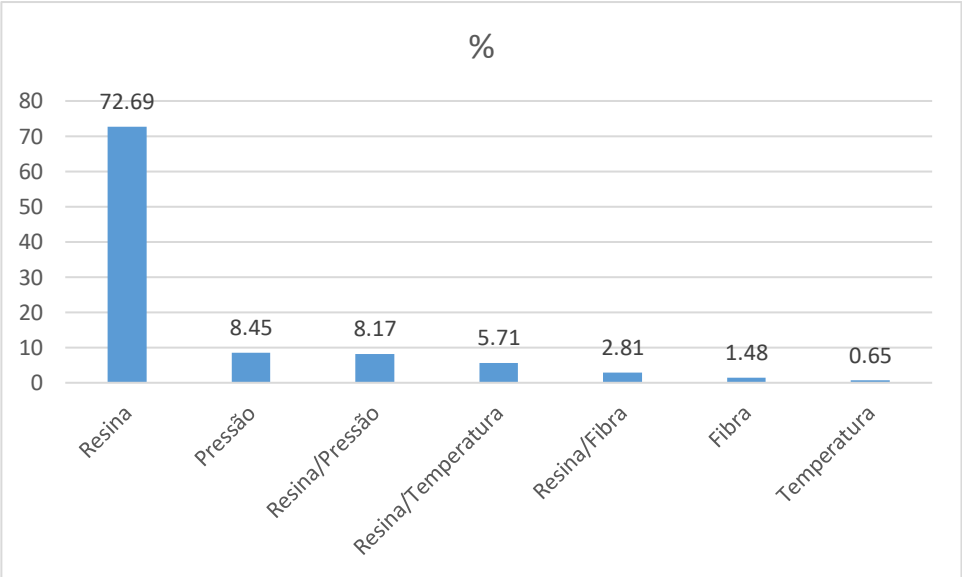
Os resultados médios obtidos para o Módulo de Elasticidade na Flexão Estática pelos 10 corpos de provas de cada tipologia produzida estão apresentados na Figura 41.

Figura 41-Resultados para o MOE: Box-Plot e Médias (MPa)



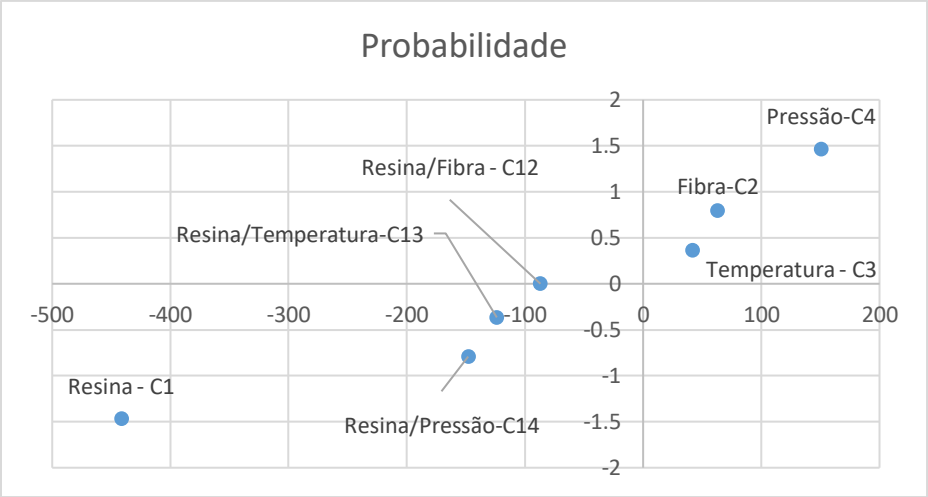
Pela Figura 41, nota-se que as tipologias $T3^2$ -1276,14 MPa (1:1, com fibra,50 ºC,2,4 MPa), $T5^2$ – 1291,86MPa (1:1, sem fibra,100ºC,2,4MPa) e $T7^2$ – 1143,24 MPa (1:1, com fibra, 100ºC,1,2MPa) apresentaram as maiores médias para o Módulo de Elasticidade na Flexão Estática (MOE) e através da análise estatística com 95% de confiança verificou-se que essas médias são estatisticamente iguais e diferentes das outras composições. As demais tipologias, com menores valores, são iguais entre si. Pela Figura 42 observa-se a porcentagem de influência de cada variável no MOE.

Figura 42-Resultado da influência dos parâmetros operacionais no MOE



Através da Figura 42, nota-se que a composição da resina foi a variável que apresentou um peso bastante significativo no Módulo de Elasticidade na Flexão Estática, com 72,69% de efeito na propriedade e ainda com mais 8,45% de efeito quando se calcula a influência da interação entre ela e a variável pressão. A pressão teve um efeito de 8,17% no MOE. Juntas, resina e pressão contribuíram com 89,31% na propriedade. A Figura 43 permite analisar se essa contribuição foi negativa ou positiva com o incremento dos valores das variáveis.

Figura 43- Gráfico de probabilidade



Observa-se, pela Figura 43, que uma maior pressão apresentou um efeito positivo no MOE e a composição da resina em seu nível maior (1:1,5) apresentou um efeito negativo. A interação entre elas também apresentou um efeito negativo, devido a maior contribuição da resina na propriedade. Ou seja, para o incremento do MOE, é desejável a composição da resina na proporção de 1:1 e maiores pressões. A temperatura que apresentou uma influência de apenas 5,71%, incrementou a propriedade positivamente no seu nível maior (100ºC).

A norma brasileira estabelece que painéis não estruturais para uso interno e em condições secas (P2), com espessura de 6 a 13mm, devem atender ao valor mínimo de 1800 MPa no Módulo de Elasticidade na resistência à flexão estática. Nenhuma das tipologias atendeu a esse requisito mínimo. Porém, ressalta-se que a pressão empregada para a realização desse estudo foi baixa em comparação as pressões normalmente utilizadas em outros estudos: 3,92MPa (MENDES et al.,2010); 4,1 MPa (QUIRINO, 2010);4,5MPa (ARAUJO,2015); 4MPa (SCATOLINO et al.,2017); 5MPa (FIORELLI et al., 2018); 5MPa (FIORELLI et al.,2019), 5MPa (GAVIOLI, 2020).

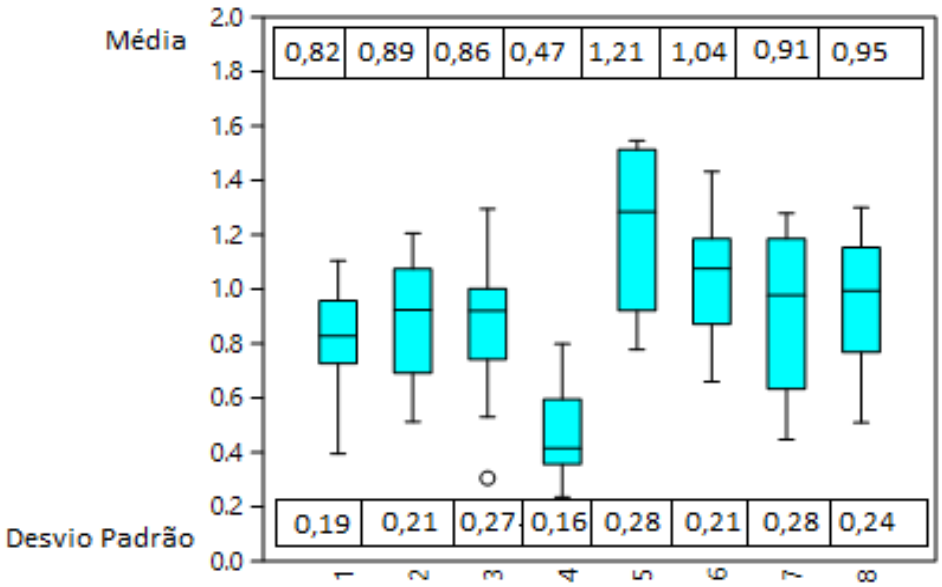
A composição da resina na proporção de 1:1,5 pode ter prejudicado o compósito devido a presença de maiores cadeias de polióis, pois com o aumento do tamanho da cadeia, há a redução da temperatura de transição vítrea e o aumento da flexibilidade (VILAR, 2004). Além disso, atualmente, o incremento do módulo de elasticidade dos painéis tem sido um desafio para as pesquisas que utilizam resíduos lignocelulósicos, porque esses materiais apresentam uma plasticidade menor que a madeira, ou seja, são mais elásticos e menos rígidos, o que influencia na deformabilidade do material (MENDES et al.2010; SCATOLINO,2017, MARTINS,2018).

A influência do aumento da pressão na propriedade pode ser explicada pelo aumento do fluxo de contanto entre as partículas e o ligante, dessa forma, aumentando o teor das ligações mecânicas (ROWELL,2005; CIANNAMEA,2017).

5.2.5.3 Influência dos parâmetros operacionais na Tração Perpendicular ou Adesão Interna

Os resultados médios obtidos para a adesão interna pelos 10 corpos de provas de cada tipologia produzida estão apresentados na Figura 44.

Figura 44- Resultados no ensaio de Tração Perpendicular: Box-Plot e Médias (MPa)



Analisando a Figura 44, infere-se que a tipologia $T4^2$ (1:1,5, com fibra,50ºC,1,2MPa) apresentou o menor valor para a adesão interna e que a tipologia $T5^2$ (1:1, sem fibra,100ºC,2,4MPa) apresentou um maior valor. Através da ANOVA (95% confiança) e teste de Tuckey verificou-se que o valor de tração perpendicular do painel $T5^2$ (1:1, sem fibra,100ºC,2,4MPa) é estatisticamente igual aos compósitos $T6^2$ (1:1,5, sem fibra, 100ºC,1,2MPa), $T7^2$ (1:1, com fibra, 100ºC,1,2MPa) e $T8^2$ (1:1, 5 ,com fibra,100ºC,2,4MPa) e confirma-se que a tipologia $T4^2$ (1:1,5, com fibra,50ºC,1,2MPa) apresentou o pior desempenho.

A verificação dos efeitos e do incremento das variáveis na adesão interna são mostrados nas Figuras 45 e 46, respectivamente.

Figura 45- Resultado da influência dos parâmetros operacionais na adesão interna

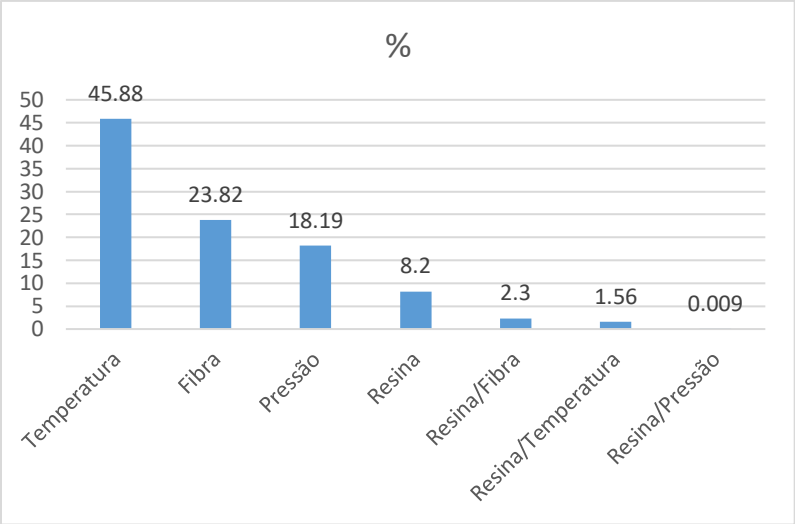
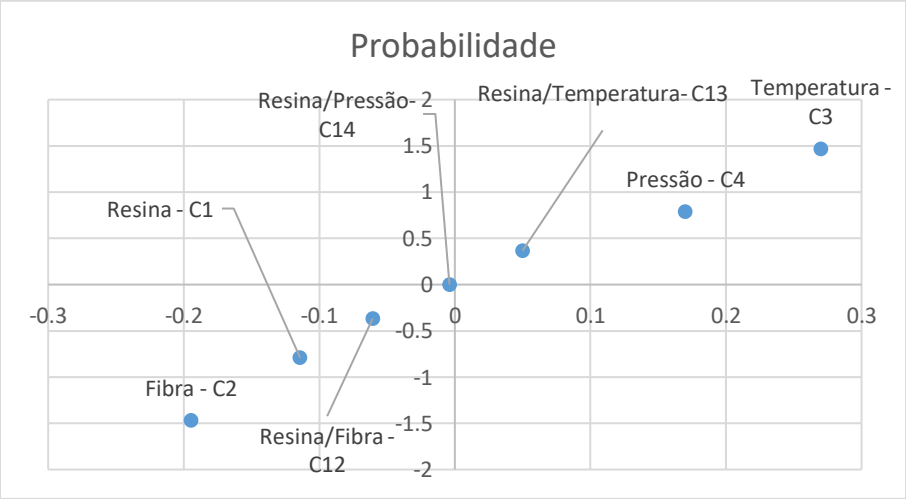


Figura 46- Gráfico de Probabilidade



A variável temperatura apresentou a maior influência nos resultados de tração (45,88%) e o seu incrementou afetou positivamente a propriedade, ou seja, maior temperatura, maior adesão interna. A variável presença de fibras teve um efeito de 23,82% no valor da propriedade e prejudicou a adesão do compósito, ou seja, esse parâmetro em um nível maior (+ = com fibras), afetou negativamente os valores de tração. A pressão foi a terceira variável mais significativa (18,19%) e um valor maior de pressão melhorou a adesão do painel, seguida da composição da resina (8,2%), que prejudicou a propriedade quando presente em um nível maior (+ = 1:1,5). Através da análise desses dados, conclui-se, que para a tração, as condições

operacionais de maior temperatura, composição da resina de 1:1, ausência da fibra de sisal e maior pressão, incrementam os valores de adesão interna.

A norma brasileira para a condição de uso (P2), com espessura de 6 a 13mm, estabelece um valor mínimo de 0,40MPa no ensaio de tração. Todas as tipologias atenderam a esse requisito.

A adição da fibra de sisal ao compósito pode ter diminuído a interação entre a fibra e a matriz polimérica em decorrência do seu emaranhamento, com a consequência de provocar uma menor molhabilidade do sisal pelo polímero (NAIR; THOMAS; GROENINCKX,2001; POLETTO et al. 2009; FIORELLI et al. 2018). Além disso, para baixos teores de fibras, a matriz não é ancorada suficientemente pelas fibras e ocorrem deformações locais elevadas na matriz, o que faz com que a ligação fibra-matriz se rompa e as fibras sacadas (JOSEPH; MEDEIROS; CARVALHO,2009).

Um outro fator que favorece a interação interfacial é o fenômeno de contração que a matriz polimérica sofre durante a sua cura. Para que ocorra uma melhor distribuição de tensões sobre a superfície do reforço, durante o fenômeno de contração é necessário que ocorra um molhamento perfeito do reforço pela resina (CAVALCANTI, 2006). A contração volumétrica também pode ser reduzida pela adição de fibras (MALLICK, 2007).

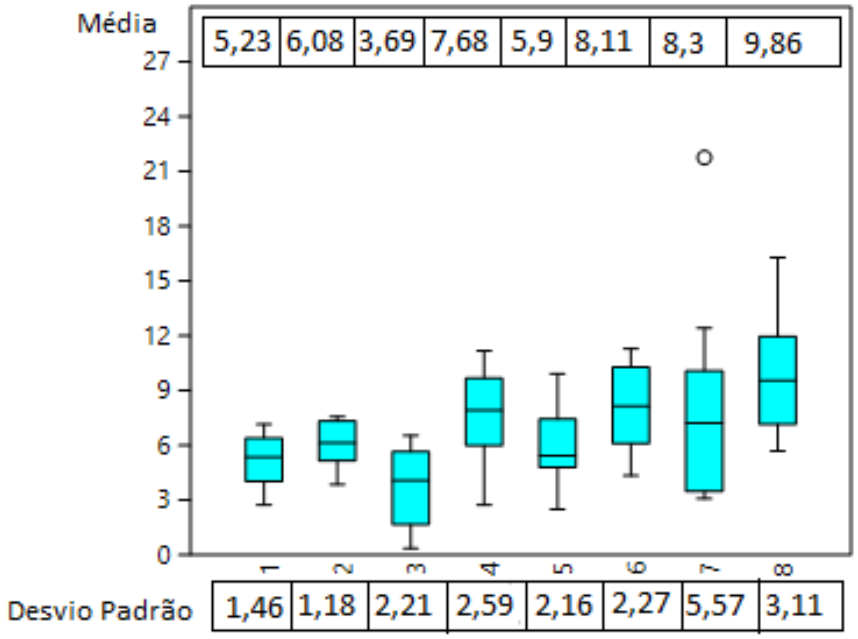
A temperatura e a pressão são também importantes aspectos da moldagem de um polímero por compressão, o material é colocado no molde, no qual é fechado e a metade superior do molde é abaixada até que a pressão na carga aumente para um nível predefinido. Com o aumento da pressão, a resina começa a fluir e preencher a cavidade. O fluxo do material é necessário para expelir o ar aprisionado tanto no molde quanto na carga. Dependendo do teor de fibra, a moldagem por pressão pode variar de 1,4 a 34,5 MPa. Normalmente, altas pressões são necessárias para materiais que contêm nervuras profundas e saliências. A temperatura geralmente está na faixa de 130 ºC a 160 ºC. Uma menor viscosidade da resina provoca uma menor resistência ao seu fluxo sob tensões de cisalhamento, para todos os fluidos, a viscosidade diminui com o aumento da temperatura (MALLICK, 2007). Dessa forma, maiores temperaturas e maiores pressões, também melhoram a interação e molhabilidade entre a carga e a matriz polimérica aumentando a propriedade de adesão.

Ademais, os aglomerados de fibra de sisal (visíveis nos compósitos) podem ter prejudicado a dispersão do adesivo no momento da sua mistura manual com as cargas, antes da prensagem.

5.2.5.4 Influência dos parâmetros operacionais no Inchamento em espessura

Os resultados médios obtidos para o inchamento em espessura pelos 10 corpos de provas de cada tipologia produzida estão apresentados na Figura 47:

Figura 47- Resultado da influência dos parâmetros operacionais no Inchamento em espessura (24h)

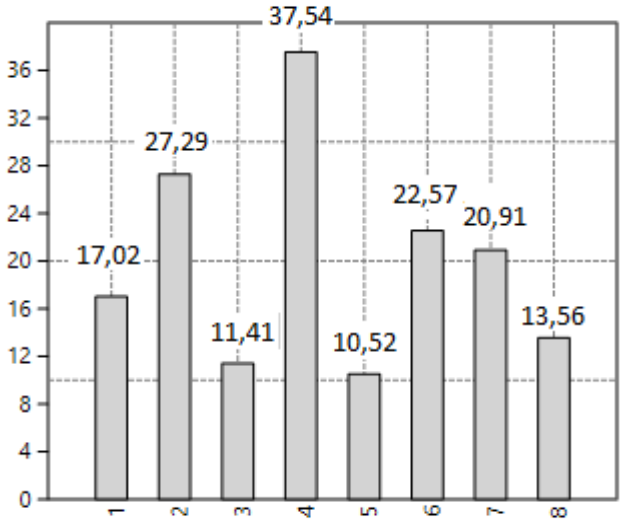


Ao contrário das outras propriedades anteriores, é desejável que o compósito apresente um menor inchamento. Porém, todos os compósitos apresentaram um valor compatível com a normalização brasileira, na qual estabelece um valor máximo de 22% para 24h de imersão em água. Os dados obtidos no ensaio de inchamento não apresentaram a mesma variância, por isso a análise estatística foi efetuada através do teste F de Welch (95% confiança). A distribuição provavelmente não uniforme das fibras no compósito pode ter influenciado nesse resultado. Na análise post hoc foi possível verificar que das oito tipologias confeccionadas, seis delas apresentaram o mesmo resultado estatístico, assim as diferenças no processo de produção do compósito não modificaram de maneira muito significativa o resultado final.

5.2.5.5 Absorção de Água e Densidade

Na Figura 48 é apresentado os valores médios de absorção de água (%) para 10 corpos de provas de cada tipologia produzia.

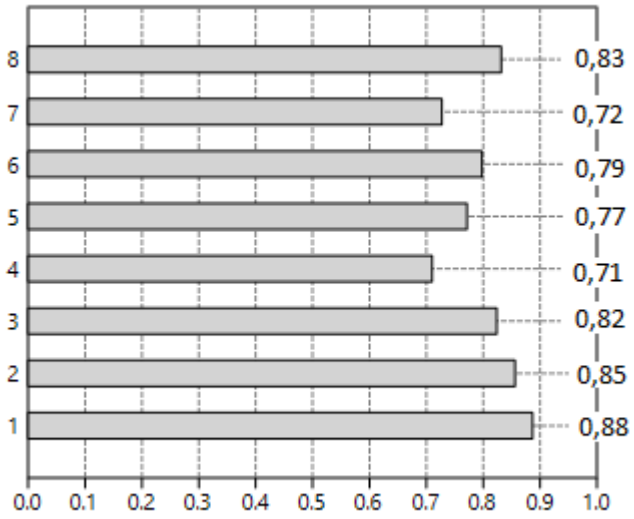
Figura 48– Resultados para absorção de água em porcentagem (%)



Nota-se que o compósito T4[2] (1:1,5,50 ºC,1,2MPa, com fibra) apresentou o maior valor para a absorção de água (37,54%) e o compósito T5[2] (1:1,100 ºC,2,4MPa, sem fibra) absorveu uma quantidade menor (10,52%). Pelos resultados demonstrados, infere-se que a presença de fibras, em uma proporção de resina de 1:1,5, uma menor pressão e temperatura, incrementou essa capacidade de absorção. O aumento da temperatura pode ter melhorado a dispersão da resina, provocando um melhor envolvimento da resina às fibras e dificultando a absorção de água, pois as fibras são materiais higroscópicos, enquanto a matriz de poliuretana é hidrofóbica. Além disso, a proporção da resina de 1:1,5 pode ter diminuído a interação fibra/matriz aumentando a quantidade de espaços vazios, o que também pode ter ocorrido em menores pressões devido a menor compactação do material. No entanto, todos os valores foram menores do que painéis de eucalipto normalmente comercializados (50%) (NASCIMENTO, 2003).

Na Figura 49 é apresentado os valores médios para a densidade em g/cm^3 para 10 corpos de provas de cada tipologia produzia.

Figura 49 – Resultados para a densidade aparente dos compósitos (g/cm³)



As densidades obtidas no ensaio experimental divergiram da densidade nominal estabelecida para os compósitos devido aos diferentes parâmetros operacionais executados e aplicação das fibras de sisal de modo aleatório. Os painéis T4[2] (1:1,5,50 ºC,1,2MPa, com fibra) e T7[2] (1:1, com fibra, 100ºC,1,2MPa) foram classificados como sendo de média densidade, os demais foram classificados como sendo de alta densidade.

5.2 CAPÍTULO 2: Caracterização Acústica e Térmica dos compósitos produzidos com a casca de café obtida pela via seca.

5.2.1 Introdução

Com o objetivo de investigar a utilização do resíduo para o desenvolvimento de placas para o conforto ambiental de ambientes internos, foi realizada uma investigação das características acústicas e térmicas dos compósitos confeccionados na segunda fase da pesquisa.

O ruído em recintos pode causar dificuldades de comunicação e dificuldades de concentração. Em salas fechadas, a propagação sonora sofre a interferência das superfícies que a delimitam, como as paredes e o teto, por exemplo. Quando o som incide nessas superfícies, a energia sonora é em parte refletida e a parcela remanescente é absorvida. Uma medida da capacidade de absorção de energia sonora de superfícies é dada pelo coeficiente de absorção sonora (α). Materiais tipicamente utilizados para absorver som são fibrosos ou porosos. Um bom absorvente de som é o material que permite que as partículas do ar penetrem e se movimentem em seu interior (BISTAFA,2006).

Segundo Buratti et al. (2016), materiais de absorção de som são geralmente baseados em meios sintéticos porosos, com processos de produção caros, alto consumo de energia e alto impacto ambiental e destaca que materiais reciclados estão se tornando uma alternativa interessante. Ricciardi et al. (2017) estudaram o resíduo obtido na torra do café, a película prateada, como material de absorção acústica. Pontuam que os isolamentos amplamente utilizados na indústria da construção são à base de fibra de vidro, que são derivados de fontes de sílica ou outras fibras sintéticas e que são conhecidos pelos seus efeitos cancerígenos. Nesse estudo, três tipos de amostras de alta densidade foram produzidas com o resíduo sólido: colada com uma cola à base de água fria e 5,5% em massa de adesivo poliuretano; resíduo prensado a frio e resíduo prensado a quente (140ºC). Através de ensaios realizados em tubo de impedância na faixa de frequência de 100Hz a 5000Hz, obtiveram os seguintes resultados, para cada amostra, respectivamente: $\alpha = 0,38$; $\alpha=0,47$ e $\alpha= 0,21$. As amostras demonstraram um bom comportamento nas médias e altas frequências (800Hz – 3200Hz).

Buratti et al. (2018) avaliaram a condutividade térmica e o coeficiente de absorção sonora de um painel de baixa densidade confeccionado com o resíduo casca de arroz. A casca foi colada com um aglutinante à base de água fria e adesivo poliuretano na proporção de 2,5% em massa. O painel apresentou um coeficiente médio de $\alpha= 0,33$, se mostrando mais eficiente na faixa de frequência de 1600Hz até 4000Hz, obtido através de um tubo de impedância com experimentos na faixa de 200Hz a 64000Hz.A condutividade térmica foi de 0,070 W/mK.

Cravo et al. (2014) investigaram as propriedades térmicas de um compósito à base de casca de amendoim, fibra de coco (50:50) e 15% de resina poliuretana bi-componente à base de óleo de mamona (1:1;100oC,10 min,5MPa) para aplicação como forro em aviários. A condutividade térmica do material foi medida através do "Método do Fio Quente Paralelo" e o resultado obtido foi de de 0,29W/mK. Esse valor é superior aos materiais isolantes comerciais: lã de rocha (0,045W/mK), lã de vidro (0,045W/mK) e poliestireno expandido (0,040W m/K). A condutividade térmica mais baixa indica que o material é melhor para o isolamento térmico.

Mesquita,A. et al. (2016) produziram painéis de três camadas com a ureia formaldeído, partículas de eucalipto nas camadas externas e partículas de eucalipto combinadas às fibras de coco e sisal na camada interna. Os teores de substituição da madeira pelas fibras foram de 10% e 20%. Para o compósito com 10% de fibra de sisal o valor da condutividade térmica foi de 0,125 W/MK, para o painel com 20% de fibra sisal foi de 0,145 W/mK e para a amostra sem substituição o valor foi de 0,145 W/mK.

Bekalo e Reinhardt (2010) investigaram a condutividade térmica de três painéis confeccionados em sua pesquisa. Os painéis se constituíram de casca de café obtida pela via seca, adesivo PMDI nas proporções de 8% e 12% em massa e de uréia formaldeio na proporção de 15% em massa. Obtiveram os resultados aproximados de 0,110 W/mK para todas essas tipologias.

5.2.2 Metodologia

5.2.2.1 Ensaio acústico - Kundt's Impedance Tube (coeficiente de absorção por incidência normal)

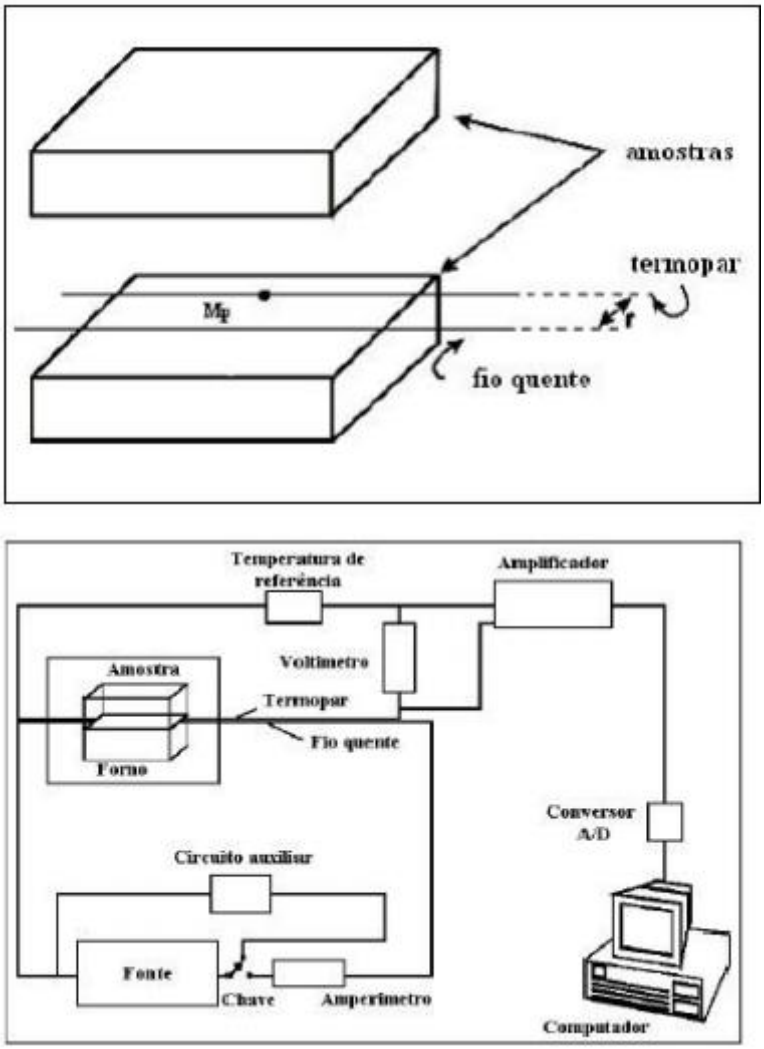
As propriedades de absorção sonora foram aferidas por meio do tubo de impedância de Kundt, de acordo com o padrão ISO 10534-2: Acoustics – Determination of sound absorption coefficient and impedance in impedance tubes- Part 2: Transfer-function method. Para o teste foram utilizadas 1 amostra cilíndrica de 10 cm de diâmetro para cada uma das 8 tipologias produzidas. A espessura das amostras variou, pois cada placa foi confeccionada com diferentes parâmetros de processamento. As tipologias $T1^2$ (1:1,50ºC,1,2MPa, sem fibra) ,$T2^2$ (1:1,5,50ºC,2,4MPa, sem fibra), $T3^2$ (1:1,50ºC,2,4 MPa, com fibra),$T6^2$ (1:1,5, 100ºC,1,2MPa, sem fibra) e $T8^2$ (1:1,100ºC,2,4MPa, com fibra) apresentaram a espessura de 1,5 cm, a tipologia $T4^2$ (1:1,5;50ºC,1,2MPa, com fibra) a espessura alcançada foi de 2,1 cm, a tipologia $T5^2$ (1:1.100ºC, 1,2MPa, sem fibra) alcançou a

espessura de 1,7cm e para a T7[2] (1:1.100ºC,1,2MPa,com fibra) foi de 2,5 cm. Além disso, a prensa hidráulica utilizada para a produção dos compósitos não permitia espessuras maiores que 1,0 cm, dessa forma, os discos amostrais se constituíram de duas placas coladas utilizando como adesivo a mesma resina poliuretana utilizada para a composição das placas. As medições foram realizadas na faixa de frequência de 250Hz-1600Hz, através de microfones de grade de proteção não destacável formando uma cavidade hermética e um alto falante montado em um lado do tubo de impedância. Para a medição do coeficiente de absorção sonora é importante medir à temperatura do ar ambiente, a umidade relativa do ar e a pressão atmosférica no laboratório para a calibração dos microfones no início do procedimento. Também é importante inserir a amostra corretamente dentro do tubo e selar as bordas. Esse ensaio foi realizado no Laboratório de Acústica Aplicada da Universidade Federal de São Carlos (UFSCAR).

5.2.2.2 Ensaio de condutividade térmica – " Hot Box: Método do Fio Quente Paralelo"

A condutividade térmica foi medida pelo "Método do Fio Quente Paralelo" (Figura 50). Para esse ensaio foi necessário um corpo de prova de cada tipologia com dimensões de 23cm x 11cm x 1cm. A aplicação do método foi relativamente simples, devido a facilidade de manipulação dos equipamentos. No aparato utilizado, desenvolvido pelo professor Wilson Nunes Santos do Departamento de Engenharia de Materiais da Universidade Federal de São Carlos, termopares e o fio quente (resistência) são dispostos na superfície da caixa e em seguida a amostra do compósito é disposta em seu sulco, outros termopares são novamente colocados e uma placa de cerâmica é colocada acima do compósito. Uma corrente contínua é aplicada ao fio quente. No final de 15 horas do começo do experimento, o software fornece a condutividade elétrica.

Figura 50– Esquema do Método do Fio a Quente Paralelo



Fonte: CARDOSO,2010

5.2.3 Resultados e Discussões

5.2.3.1 Caracterização acústica: Tubo de Impedância

Na Tabela 15, apresenta-se o resultado obtido para o coeficiente de absorção sonora (α) para cada faixa de frequência para as referidas bandas de um terço de oitava e também o seu valor médio. Na Tabela 16, apresenta-se essas mesmas informações para o resultado obtido para as bandas de oitava.

Tabela 15 – Coeficientes de absorção sonora para bandas de 1/3 de oitava

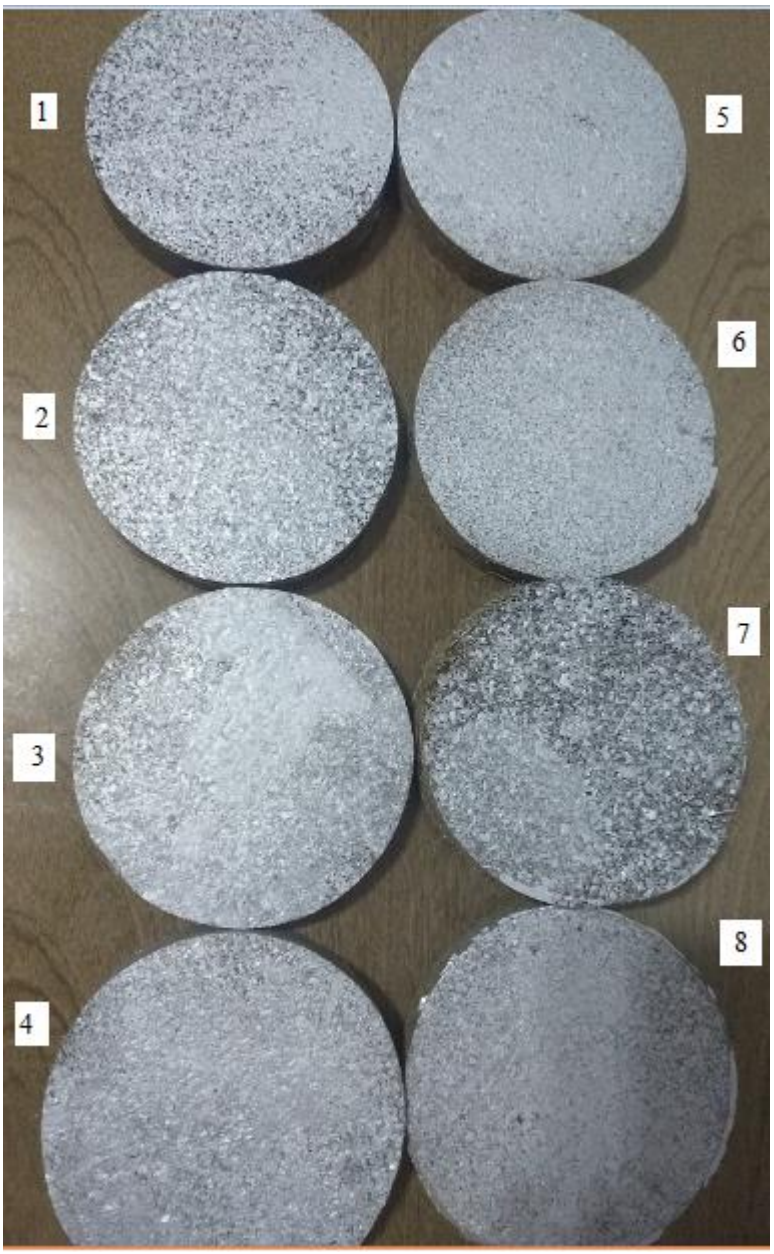
Fc (Hz)	T1[2]	T2[2]	T3[2]	T4[2]	T5[2]	T6[2]	T7[2]	T8[2]
250	0,06	0,06	0,08	0,15	0,04	0,08	0,18	0,07
315	0,06	0,09	0,13	0,15	0,06	0,14	0,16	0,12
400	0,08	0,12	0,19	0,08	0,05	0,18	0,17	0,16
500	0,12	0,22	0,33	0,14	0,09	0,2	0,22	0,24
630	0,16	0,3	0,32	0,19	0,14	0,12	0,29	0,26
800	0,13	0,28	0,24	0,25	0,24	0,09	0,46	0,23
1000	0,09	0,19	0,16	0,23	0,42	0,09	0,6	0,16
1250	0,09	0,16	0,12	0,19	0,48	0,12	0,54	0,13
1600	0,13	0,15	0,12	0,21	0,32	0,09	0,59	0,13
Média	0,10	0,17	0,18	0,17	0,20	0,12	**0,35**	0,16

Tabela 16 – Coeficientes de absorção sonora para bandas de oitava

Fc (Hz)	T1[2]	T2[2]	T3[2]	T4[2]	T5[2]	T6[2]	T7[2]	T8[2]
250	0,06	0,08	0,1	0,15	0,05	0,11	0,17	0,07
500	0,12	0,21	0,28	0,14	0,09	0,17	0,22	0,17
1000	0,1	0,21	0,17	0,22	0,38	0,1	0,53	0,22
Média	0,09	0,16	0,18	0,17	0,17	0,12	**0,30**	0,15

Nota-se pelas Tabelas 15 e 16, que a tipologia T7[2] (1:1,100ºC,1,2MPa, com fibra) apresentou um maior coeficiente de absorção sonora. O resultado dessa tipologia foi compatível com os resultados obtidos por Buratti et al. (2018) que obteve o valor médio de α=0,33 (casca de arroz) e também é similar aos valores obtidos de α=0,21, α=0,38 e α =0,47 (película prateada) por Ricciardi et al. (2017). Essa tipologia apresentou uma porosidade visivelmente maior que das outras amostras ao observar a sua superfície (Figura 51).

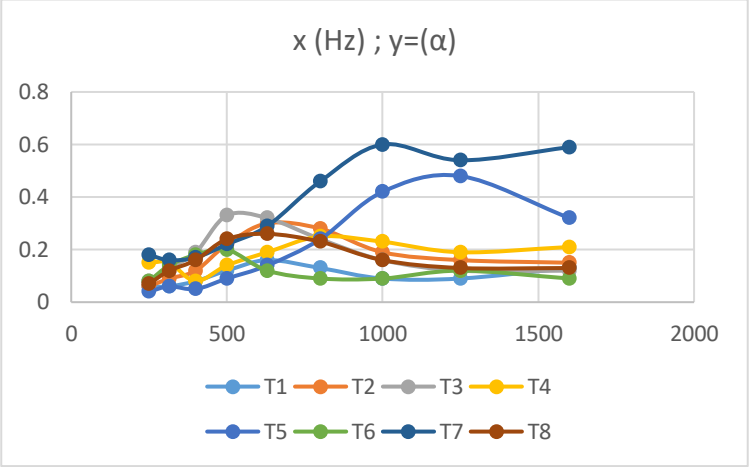
Figura 51 – Amostras utilizadas para a obtenção dos coeficientes de absorção sonora



Importante considerar que para a realização do ensaio as amostras não estavam pintadas, portanto, não houve qualquer modificação de sua superfície. As medidas realizadas em tubo de impedância fornecem o coeficiente de absorção do som para a incidência normal das ondas sonoras, podendo apresentar pequenos desvios de valores obtidos em câmaras reverberantes, que fornecem o coeficiente de absorção para incidência de campo das ondas sonoras.

Os dados obtidos para as faixas de frequência na banda de um terço de oitava foram dispostos na Figura 52 para maiores considerações.

Figura 52– Resultados para as faixas de frequência na banda de um terço de oitava



Observa-se que os melhores resultados para a tipologia $T7^2$ foram obtidos a partir da frequência de 800 Hz. No estudo de Ricciardi et al. (2017) as amostras demonstraram um bom comportamento nas médias e altas frequências (800Hz – 3200Hz) e no estudo de Buratti et al. (2018) o painel foi mais eficiente na faixa de frequência de 1600Hz até 4000Hz.

Como os resultados para as amostras $T7^2$ e $T5^2$ foram diferentes das demais, tentou-se replicar essas medições para verificar se outras amostras, dessas mesmas duas tipologias, apresentavam o mesmo comportamento. Desse modo, as Figuras 53 e 54, demonstram os novos resultados obtidos, assim como a sua comparação visual com o comportamento das primeiras medições.

Figura 53– Resultados obtidos por novas amostras da tipologia T7

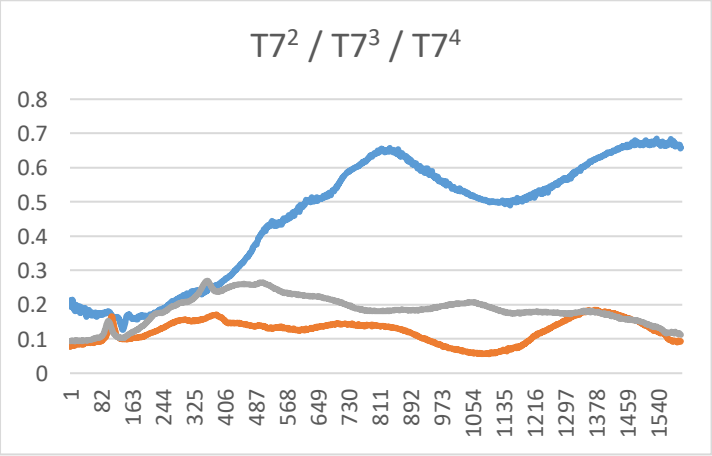
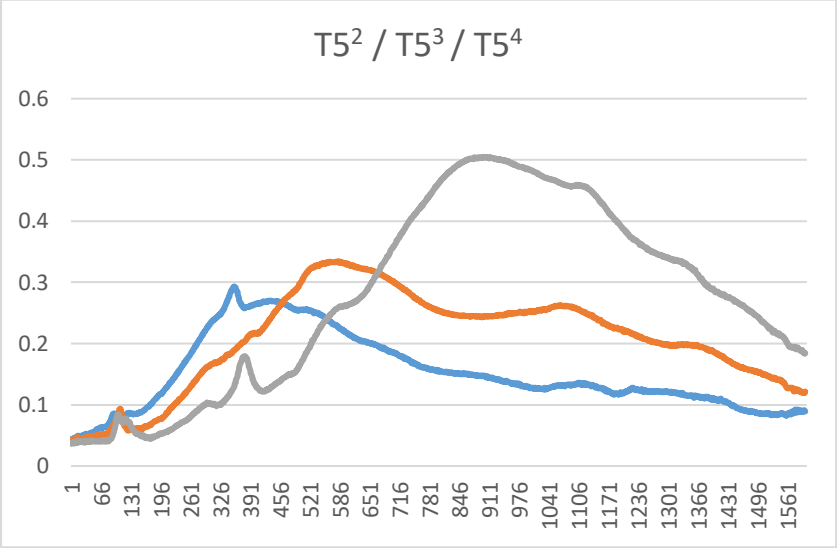


Figura 54 – Resultados obtidos por novas amostras da tipologia T5



Como pode ser percebido pelas figuras, não foi obtido os mesmos resultados com as novas amostras, porém, cabe frisar que houve problemas em sua produção. A prensa atingiu temperaturas maiores do que 100 ºC, a folha de acetato utilizada como desmoldante se fundiu na superfície da amostra e acredita-se que houve pouca distribuição de parafina para impedir a adesão. Dessa forma, essas amostras apresentaram um aspecto "plastificado" e aparentemente como se estivessem revestidas por uma película. O desempenho acústico dos materiais depende do livre fluxo de ar no interior do material, a presença ou não de uma película que feche os poros do material pode afetar significativamente sua performance acústica. Por isso, esse resultado não invalida o obtido anteriormente, assim como não invalida futuras pesquisas para maiores investigações do desempenho acústico desse material compósito.

Segundo Pizzi e Mittal (2017) a desvantagem clara dos aglutinantes de madeira MDI é que eles aderem fortemente a quase todas superfícies, incluindo aço. Consequentemente, agentes de liberação externos são necessários para prevenir adesão entre prensas e placas. A aplicação separada de agentes desmoldantes é um incômodo de processo que estimulou a pesquisa sobre agentes de liberação. No entanto, destaca que ninguém ainda desenvolveu um sistema de liberação verdadeiramente eficaz e que a adesão do MDI ao aço, sem dúvida inibiu o crescimento desse aglutinante na indústria de painéis de partículas.

5.2.3.2 Condutividade térmica (k)

Os resultados de condutividade térmica dos materiais desenvolvidos estão dispostos na Tabela 17:

Tabela 17 – Condutividade térmica das tipologias produzidas

Tipologia	k (W/mK)
$T1^2$	0,143
$T2^2$	0,254
$T3^2$	0,193
$T4^2$	0,143
$T5^2$	0,195
$T6^2$	0,144
$T7^2$	0,121
$T8^2$	0,151

Os valores obtidos para os compósitos são compatíveis com valores obtidos por chapas aglomeradas de madeira (MORESCHI,2012). As quatro tipologias produzidas com uma menor pressão ($T7^2$, $T1^2$, $T4^2$ e $T6^2$) apresentaram menores valores de condutividade. A pressão maior pode ter reduzido a porosidade do material, consequentemente a porcentagem de vazios, provocando um aumento do coeficiente.

5.4 CAPÍTULO 3: Classificação dos resíduos sólidos gerados nas lavouras cafeeiras: casca de via úmida e casca de via seca.

5.4.1 Introdução

5.4.1.1 Classificação dos resíduos sólidos

Pela NBR ABNT 10004 (2004) – Resíduos Sólidos – Classificação, os resíduos são classificados em perigosos (Classe I) ou não perigosos (Classe II). E ainda os resíduos não perigosos são classificados em não inertes (Classe II-A) ou em inertes (Classe II –B). Os resultados do ensaio de lixiviação os classifica como perigosos ou não perigosos (NBR ABNT 10005 (2004) - Procedimento para obtenção de extrato lixiviado de resíduos sólidos), enquanto que os resultados do ensaio de solubilização classificam os não perigosos como inertes ou não inertes (NBR ABNT 10006 (2004) – Procedimentos para obtenção de extrato solubilizado de resíduos sólidos).

A periculosidade é determinada em função das propriedades físicas, químicas ou infectocontagiosas de um resíduo, que podem apresentar riscos à saúde pública provocando mortalidade, incidência de doenças ou acentuando esses índices; ou riscos ao meio ambiente se o resíduo sólido for gerenciado de maneira inadequada (item 3.2). Os resíduos não perigosos e não inertes podem ter propriedades tais como: biodegradabilidade, combustibilidade ou solubilidade em água (item 4.2.2.1); os resíduos não perigosos e inertes não têm nenhum de seus constituintes solubilizados a concentrações superiores aos padrões de potabilidade de água, excetuando-se aspecto de cor, turbidez, dureza e sabor (item 4.2.2.2).

Segundo essa regulamentação, a classificação dos resíduos envolve a identificação do processo ou atividade que lhes deu origem e a comparação de seus constituintes com listagem de resíduos e substâncias cujo impacto à saúde e ao meio ambiente é conhecido.

5.4.2 Metodologia

5.4.2.1 Coleta e armazenamento das amostras

As amostras das cascas de café obtidas pela via úmida e pela via seca foram coletadas em pontos aleatórios das camadas superiores das pilhas de resíduos dispostas nas fazendas de Pedregulhos/SP e São Carlos/SP, respectivamente. A coleta foi realizada nesses pontos mais superficiais das pilhas com o objetivo de obter os resíduos mais recentemente dispostos na propriedade rural. As cascas utilizadas para a realização dos experimentos de classificação e

obtidas pela via seca foram armazenadas em congelador convencional, conservadas na temperatura de -2ºC, aproximadamente. As cascas obtidas pela via úmida passaram por uma etapa de secagem em estufa na temperatura de 60ºC e foram armazenadas em freezer horizontal, conservadas na temperatura de -10ºC.

5.4.2.2 Obtenção do extrato lixiviado e solubilizado

Para a obtenção dos extratos lixiviados e solubilizados, ambas as amostras passaram por uma etapa de trituração utilizando um liquidificador industrial de aço inox e alta rotação. As amostras foram trituradas até que a granulometria do material permitiu a passagem das partículas dos resíduos através de uma peneira de 9,5mm.

O procedimento de lixiviação é normatizado pela NBR ABNT 10005 (2004) - Procedimento para obtenção de extrato lixiviado de resíduos sólidos e consiste em agitar mecanicamente por 18 horas com rotação de 30 rpm o resíduo misturado à uma solução extratora. Esse processo foi realizado no equipamento ZHE extractor (Figura 55). A solução de extração utilizada após a realização dos procedimentos especificados pelo item 5.1.3 dessa mesma norma, foi a solução denominada de número 1, que foi preparada de acordo com as especificações do item 4.2.6 (5,7ml de ácido acético glacial; 64,3 ml de NaOH 1,0N; água destilada, deionizada e isenta de orgânicos até completar o volume de um balão volumétrico de 1L). Após o período de agitação do material, a amostra deve ser filtrada, primeiramente, por um papel filtro simples e depois em membranas mais finas com o auxílio de um compressor à vácuo. Esses procedimentos foram realizados no Laboratório de Saneamento – SHS/EESC/USP.

Figura 55 – Equipamento para a extração do líquido lixiviado

Fonte: acervo da autora

O procedimento de solubilização é normatizado pela NBR ABNT 10006 (2004) – Procedimentos para obtenção de extrato solubilizado de resíduos sólidos e consiste em colocar uma amostra de 250g do resíduo em um frasco de 1500ml para a posterior adição de 1000ml de água destilada, desionizada e isenta de orgânicos. Esse material foi manualmente agitado por 5min, posteriormente fechado e deixado em repouso por 7 dias no Laboratório de Resíduos Sólidos – SHS/EESC/USP em temperatura ambiente. Assim como o procedimento de lixiviação, essa solução deveria ser filtrada em membrana com porosidade de 45µm e o auxílio de uma compressor a vácuo, porém, devido a constante colmatação da membrana, o processo de filtração precisou ser modificado e para essa experimentação consistiu em passar o líquido por um filtro de café, seguido por um papel filtro (Figura 56).

Figura 56 – Etapas de Filtração: 1- filtração em filtro de café do solubilizado da casca de café obtida pela via úmida; 2 – filtração em papel filtro do solubilizado da casca de café obtida pela via seca

Fonte: acervo da autora

Foram obtidos 8 diferentes frascos amostrais, pois esses procedimentos foram realizados duas vezes. O primeiro procedimento foi efetuado para a realização das análises dos compostos inorgânicos especificados nos Anexos F e G da NBR ABNT 10004 (2004) – Resíduos Sólidos – Classificação, que foi realizada no Laboratório de Saneamento – SHS/EESC/USP.O segundo procedimento foi realizado para a análise dos compostos orgânicos especificados na mesma norma e analisados pelo Laboratório Ecosystem-Campinas, as amostras foram transportadas de

São Carlos para Campinas em uma caixa de isopor com gelo. Ainda, foi obtido mais 1 frasco amostral para a realização de um ensaio de solubilização adicional, que analisou os compostos inorgânicos presentes no líquido solubilizado extraído do compósito de tipologia 5, produzido com o resíduo casca de café obtido pela via seca. Esse experimento foi realizado levando em consideração os resultados obtidos nos ensaios anteriores e também foi realizado no Laboratório de Saneamento – SHS/EESC/USP, além disso, o compósito foi submetido a esse ensaio para verificar se o potencial poluidor encontrado no resíduo foi encapsulado pela matriz do polímero.

Os dois laboratórios são acreditados e a metodologia de análise para cada parâmetro da normatização estão especificados nas Tabelas 19 a 25, juntamente com os resultados dos ensaios e a comparação com os limites exigidos pela ABNT NBR 10004 (2004).

5.4.2 Resultados

*Tabela 18– Resultados dos compostos **inorgânicos** presentes no extrato **solubilizado** da casca de café obtida por **via úmida***

Parâmetros	Resultados (mg/L)	ABNT NBR 10004:2004 (mg/L)	Limite de Detecção (mg/L)	Método Referência Standard Methods-SMWW 23ªEdição; Hach water analysis handbook-HWAH
Alumínio	0,02	0,2	0,01	SMWW 3111 D
Arsênio	<0,0001	0,01	0,0001	SMWW 3114 B
Bário	0,58	0,7	0,001	SMWW 3111 D
Cádmio	**0,009**	0,005	0,0006	SMWW 3111 B
Chumbo	**0,03**	0,01	0,01	SMWW 3111 B
Cianetos	<0,001	0,07	0,001	HWAH 8027
Cloretos	2,2	250,0	0,1	HWAH 8113
Cobre	1,474	2,0	0,003	SMWW 3111 B
Cromo Total	<0,005	0,05	0,005	SMWW 3111 B
Ferro Total	**13,38**	0,3	0,005	SMWW 3111 B
Fluoretos	0,44	1,5	0,01	HWAH 8029
Manganês	**0,405**	0,1	0,003	SMWW 3111 B
Mercúrio	< 0,001	0,001	0,0001	SMWW 3112 B
Nitratos	**90**	10,0	0,01	SMWW 4500-NO_3^- B
Prata	< 0,001	0,05	0,001	SMWW 3111 B
Selênio	< 0,001	0,01	0,001	SMWW 3111 D
Sódio	12,5	200,0	0,1	SMWW 3500-Na B
Sulfatos	13	250,0	1	HWAH 8051
Surfactantes	**1,34**	0,5	0,20	SMWW 5540 C
Zinco	0,356	5,0	0,002	SMWW 3111 B
pH do solubilizado	7,53		1 a 14	SMWW 4500-H^+ B

*Tabela 19– Resultados dos compostos **inorgânicos** presentes no extrato **solubilizado** da casca de café obtida por **via seca** e do **compósito produzido***

Parâmetros	Resultados in natura (mg/L)	Compósito (mg/L)	ABNT NBR 10004:2004 (mg/L)	Limite de Detecção (mg/L)	Método Referência
Alumínio	**2,71**	**< LD**	0,2	0,01	SMWW 3111 D
Arsênio	< LD	< LD	0,01	0,0001	SMWW 3114 B
Bário	**1,37**	**0,66**	0,7	0,001	SMWW 3111 D
Cádmio	< LD	0,004	0,005	0,0006	SMWW 3111 B
Chumbo	**0,04**	**< LD**	0,01	0,01	SMWW 3111 B
Cianetos	< LD	0,005	0,07	0,001	HWAH 8027
Cloretos	2,2	1,0	250,0	0,1	HWAH 8113
Cobre	0,616	0,722	2,0	0,003	SMWW 3111 B
Cromo Total	< LD	< LD	0,05	0,005	SMWW 3111 B
Ferro Total	**12,17**	**0,596**	0,3	0,005	SMWW 3111 B
Fluoretos	0,46	0,20	1,5	0,01	HWAH 8029
Manganês	**3,11**	**1,471**	0,1	0,003	SMWW 3111 B
Mercúrio	< LD	< LD	0,001	0,0001	SMWW 3112 B
Nitratos	**526**	**189**	10,0	0,01	SMWW 4500-NO_3^- B
Prata	< LD	< LD	0,05	0,001	SMWW 3111 B
Selênio	< LD	< LD	0,01	0,001	SMWW 3111 D
Sódio	10,2	8,7	200,0	0,1	SMWW 3500-Na B
Sulfatos	16	< LD	250,0	1	HWAH 8051
Surfactantes	< LD	< LD	0,5	0,20	SMWW 5540 C
Zinco	0,855	0,298	5,0	0,002	SMWW 3111 B
pH do solubilizado	3,96	6,67		1 a 14	SMWW 4500-H^+ B

*Tabela 20– Resultados dos compostos **inorgânicos** presentes no extrato **lixiviado** da casca de café obtida por **via úmida***

Parâmetros	Resultados (mg/L)	ABNT NBR 10004:2004 (mg/L)	Limite de Detecção (mg/L)	Método Referência
Arsênio	< LD	1,0	0,0001	SMWW 3114 B
Bário	0,62	70,0	0,001	SMWW 3111 D
Cádmio	0,009	0,5	0,0006	SMWW 3111 B
Chumbo	0,07	1,0	0,01	SMWW 3111 B
Cromo Total	< LD	5,0	0,005	SMWW 3111 B
Fluoretos	0,09	150,0	0,01	HWAH 8029
Mercúrio	< LD	0,1	0,0001	SMWW 3112 B
Prata	0,171	5,0	0,001	SMWW 3111 B
Selênio	< LD	1,0	0,001	SMWW 3111 D
pH do lixiviado	--	--	1 a 14	SMWW 4500-H^+ B

*Tabela 21– Resultados dos compostos **inorgânicos** presentes no extrato **lixiviado** da casca de café obtida por **via seca***

Parâmetros	Resultados (mg/L)	ABNT NBR 10004:2004 (mg/L)	Limite de Detecção (mg/L)	Método Referência
Arsênio	< LD	1,0	0,0001	SMWW 3114 B
Bário	0,09	70,0	0,001	SMWW 3111 D
Cádmio	0,007	0,5	0,0006	SMWW 3111 B
Chumbo	0,10	1,0	0,01	SMWW 3111 B
Cromo Total	< LD	5,0	0,005	SMWW 3111 B
Fluoretos	< LD	150,0	0,01	HWAH 8029
Mercúrio	< LD	0,1	0,0001	SMWW 3112 B
Prata	< LD	5,0	0,001	SMWW 3111 B
Selênio	< LD	1,0	0,001	SMWW 3111 D
pH do lixiviado	--	--	1 a 14	SMWW 4500-H^+ B

*Tabela 22 – Resultados dos compostos **orgânicos** presentes no extrato **lixiviado** da casca de café obtida por **via úmida***

Parâmetros	Resultados (mg/L)	ABNT NBR 10004:20004 (mg/L)	Limite de Detecção (mg/L)	Método Referência
Benzeno	<0,35	0,50	0,35	USEPA SW 846/2006
2,4,5-Triclofenol	<0,1	400	0,1	USEPA 8270D/2014
2,4,6- Triclorofenol	<0,1	20	0,1	USEPA 8270D/2014
Benzo(a)pireno	<0,01	0,07	0,01	USEPA 8270D/2014
1,1-Dicloroetileno	<2,00	3	2	USEPA 8270D/2014
2,4,5 T	<1	0,2	1	USEPA 8270D/2014
2,4,5 TP	<1	1	1	USEPA 8270D/2014
2,4- Dinitrotolueno	<0,14	0,13	0,14	USEPA 8270D/2014
2,4-D	<0,15	3	0,15	USEPA 8270D/2014
Aldrin+Dieldrin	<0,002	0,003	0,002	USEPA 8270D/2014
Clordano Cis+Trans	<0,02	0,02	0,02	USEPA 8270D/2014
Cresol Total	<0,06	200	0,06	USEPA 8270D/2014
Endrin	<0,001	0,06	0,06	USEPA 8270D/2014
Heptacloro epóxido + Heptacloro	<0,02	0,003	0,02	USEPA 8270D/2014
Hexaclorobenzeno	<0,001	0,10	0,001	USEPA 8270D/2014
Hexaclorobutadieno	<0,01	0,5	0,01	USEPA 8270D/2014
Hexacloroetano	<0,001	3	0,001	USEPA 8270D/2014
Lindano	<0,01	0,2	0,01	USEPA 8270D/2014
m-Cresol	<0,05	200	0,05	USEPA 8270D/2014
Metoxicloro	<0,001	2	0,001	USEPA 8270D/2014
Nitrobenzeno	<0,05	2	0,05	USEPA 8270D/2014
o-Cresol	<0,05	200	0,05	USEPA 8270D/2014
p,p-DDD+p,p-DDE+p,p-DDT	<0,003	0,2	0,003	USEPA 8270D/2014
p-Cresol	<0,05	200	0,05	USEPA 8270D/2014
Toxafeno	<0,01	0,5	0,01	USEPA 8270D/2014
Clorofórmio	<0,17	6	0,17	USEPA SW 846/2006
1,2-Dicloetano	<0,45	1	0,45	USEPA SW 846/2006
1,4 Diclorobenzeno	<0,14	7,5	0,14	USEPA SW 846/2006
Cloreto de vinila	<0,14	0,5	0,14	USEPA SW 846/2006
Clorobenzeno	<0,11	100	0,11	USEPA SW 846/2006
Metiletilcetona	<0,58	200	0,58	USEPA SW 846/2006
Piridina	<10	5	10	USEPA SW 846/2006
Tetracloreto de Carbono	<0,19	0,2	0,19	USEPA SW 846/2006
Tricloroetileno	<0,32	7	0,32	USEPA SW 846/2006
Tricloroetileno (Tricloeteno)	<0,32	7	0,32	USEPA SW 846/2006

*Tabela 23 – Resultados dos compostos **orgânicos** presentes no extrato **lixiviado** da casca de café obtida por **via seca***

Parâmetros	Resultados (mg/L)	ABNT NBR 10004:2004 (mg/L)	Limite de Detecção (mg/L)	Método Referência
Benzeno	<0,35	0,50	0,35	USEPA SW 846/2006
2,4,5-Triclofenol	<0,1	400	0,1	USEPA 8270D/2014
2,4,6- Triclorofenol	<0,1	20	0,1	USEPA 8270D/2014
Benzo(a)pireno	<0,01	0,07	0,01	USEPA 8270D/2014
1,1-Dicloroetileno	<2,00	3	2	USEPA 8270D/2014
2,4,5 T	<1	0,2	1	USEPA 8270D/2014
2,4,5 TP	<1	1	1	USEPA 8270D/2014
2,4- Dinitrotolueno	<0,14	0,13	0,14	USEPA 8270D/2014
2,4-D	<0,15	3	0,15	USEPA 8270D/2014
Aldrin+Dieldrin	<0,002	0,003	0,002	USEPA 8270D/2014
Clordano Cis+Trans	<0,02	0,02	0,02	USEPA 8270D/2014
Cresol Total	<0,06	200	0,06	USEPA 8270D/2014
Endrin	<0,001	0,06	0,06	USEPA 8270D/2014
Heptacloro epóxido + Heptacloro	<0,02	0,003	0,02	USEPA 8270D/2014
Hexaclorobenzeno	<0,001	0,10	0,001	USEPA 8270D/2014
Hexaclorobutadieno	<0,01	0,5	0,01	USEPA 8270D/2014
Hexacloroetano	<0,001	3	0,001	USEPA 8270D/2014
Lindano	<0,01	0,2	0,01	USEPA 8270D/2014
m-Cresol	<0,05	200	0,05	USEPA 8270D/2014
Metoxicloro	<0,001	2	0,001	USEPA 8270D/2014
Nitrobenzeno	<0,05	2	0,05	USEPA 8270D/2014
o-Cresol	<0,05	200	0,05	USEPA 8270D/2014
p,p-DDD+p,p-DDE+p,p-DDT	<0,003	0,2	0,003	USEPA 8270D/2014
p-Cresol	<0,05	200	0,05	USEPA 8270D/2014
Toxafeno	<0,01	0,5	0,01	USEPA 8270D/2014
Clorofórmio	<0,17	6	0,17	USEPA SW 846/2006
1,2-Dicloetano	<0,45	1	0,45	USEPA SW 846/2006
1,4 Diclorobenzeno	<0,14	7,5	0,14	USEPA SW 846/2006
Cloreto de vinila	<0,14	0,5	0,14	USEPA SW 846/2006
Clorobenzeno	<0,11	100	0,11	USEPA SW 846/2006
Metiletilcetona	<0,58	200	0,58	USEPA SW 846/2006
Piridina	<10	5	10	USEPA SW 846/2006
Tetracloreto de Carbono	<0,19	0,2	0,19	USEPA SW 846/2006
Tricloroetileno	<0,32	7	0,32	USEPA SW 846/2006
Tricloroetileno (Tricloeteno)	<0,32	7	0,32	USEPA SW 846/2006

*Tabela 24– Resultados dos compostos **orgânicos** presentes no extrato **solubilizado** da casca de café obtida por **via úmida***

Parâmetros	Resultados (µg/L)	ABNT NBR 10004:2004 (µg /L)	Limite de Detecção (µg /L)	Método Referência
2,4,5 T	<1	2	1	USEPA 8270D/2014
2.4,5 TP	<1	30	1	USEPA 8270D/2014
2,4-D	<0,15	30	0,15	USEPA 8270D/2014
Aldrin+Dieldrin	<0,002	0,003	0,002	USEPA 8270D/2014
Clordano Cis+Trans	<0,02	0,02	0,02	USEPA 8270D/2014
Endrin	<0,001	0,6	0,001	USEPA 8270D/2014
Heptacloro epóxido + Heptacloro	<0,02	0,03	0,02	USEPA 8270D/2014
Hexaclorobenzeno	<0,001	1	0,001	USEPA 8270D/2014
Lindano	<0,01	2	0,01	USEPA 8270D/2014
Metoxicloro	< 0,001	20	0,001	USEPA 8270D/2014
p,p-DDD+ p,p-DDE+p,p-DDT	<0,003	2	0,003	USEPA 8270D/2014
Toxafeno	<0,01	5	0,01	USEPA 8270D/2014

*Tabela 25 – Resultados dos compostos **orgânicos** presentes no extrato **solubilizado** da casca de café obtida por **via seca***

Parâmetros	Resultados (µg/L)	ABNT NBR 10005:20004 (µg/L)	Limite de Detecção (µg/L)	Método Referência
2,4,5 T	<1	2	1	USEPA 8270D/2014
2.4,5 TP	<1	30	1	USEPA 8270D/2014
2,4-D	<0,15	30	0,15	USEPA 8270D/2014
Aldrin+Dieldrin	<0,002	0,003	0,002	USEPA 8270D/2014
Clordano Cis+Trans	<0,02	0,02	0,02	USEPA 8270D/2014
Endrin	<0,001	0,6	0,001	USEPA 8270D/2014
Heptacloro epóxido + Heptacloro	<0,02	0,03	0,02	USEPA 8270D/2014
Hexaclorobenzeno	<0,001	1	0,001	USEPA 8270D/2014
Lindano	<0,01	2	0,01	USEPA 8270D/2014
Metoxicloro	< 0,001	20	0,001	USEPA 8270D/2014
p,p-DDD+ p,p-DDE+p,p-DDT	<0,003	2	0,003	USEPA 8270D/2014
Toxafeno	<0,01	5	0,01	USEPA 8270D/2014

5.4.3 Discussão dos resultados

5.4.3.1 Classificação do resíduo sólido casca de café obtido pela via úmida

O resíduo recebeu a classificação II-A, não-perigoso e não-inerte, devido as substâncias Cádmio (0,009 mg/L), Chumbo (0,03 mg/L), Ferro Total (13,38 mg/L), Manganês (0,405 mg/L), Nitratos (90 mg/L) e Surfactantes (1,34 mg/L) terem ultrapassado os limites estabelecidos pela NBR 10004 (2004) na análise do extrato solubilizado.

5.4.3.2 Classificação do resíduo sólido casca de café obtido pela via seca

O resíduo recebeu a classificação II-A, não-perigoso e não-inerte, devido os compostos Alumínio (2,71 mg/L), Bário (1,37 mg/L), Chumbo (0,04 mg/L), Ferro Total (12,17 mg/L), Manganês (3,11 mg/L) e Nitratos (526 mg/L) terem ultrapassado os limites estabelecidos pela NBR 10004 (2004) na análise do extrato solubilizado.

5.4.3.3 Classificação do compósito produzido com o resíduo sólido casca de café obtido pela via seca

O compósito recebeu a classificação II-A, não-perigoso e não-inerte, devido os compostos Ferro total (0,596 mg/L), Manganês (1,471 mg/L) e Nitratos (189 mg/L) terem ultrapassado os limites estabelecidos pela NBR 10004 (2004) na análise do extrato solubilizado. O Alumínio, que no resíduo *in natura* estava presente na concentração de 2,71 mg/L, teve sua concentração diminuída para um nível abaixo do limite de detecção do equipamento.O mesmo ocorreu com o Chumbo, presente na concentração de 0,04 mg/L na casca de café obtida pela via seca. O Bário teve sua concentração diminuída e sua concentração no líquido obtido com a solubilização do compósito caiu de 1,37 mg/L para 0,66mg/L. Esses três elementos, que antes estavam presentes em concentrações acima das permitidas pela NBR 10004 (2004), foram encapsulados pela matriz do compósito, atingindo concentrações ambientalmente adequadas. A seguir, apresenta-se a Tabela 26 com o resumo desses três resultados de classificação.

Tabela 26 – Compostos com concentrações acima dos limites estabelecidos pela NBR 10004 (2004)

Casca de via úmida	Casca de via seca	Compósito
Cádmio (0,009 mg/L)	Alumínio (2,71 mg/L)	-
Chumbo (0,03 mg/L)	Chumbo (0,04 mg/L)	-
Ferro Total (13,38 mg/L)	Ferro Total (12,17 mg/L)	Ferro total (0,596 mg/L)
Manganês (0,405 mg/L)	Manganês (3,11 mg/L)	Manganês (1,471 mg/L)
Surfactantes (1,34 mg/L)	Bário (1,37 mg/L)	-
Nitratos (90 mg/L)	Nitratos (526 mg/L)	Nitratos (189 mg/L)

Os metais encontrados no extrato solubilizado dos resíduos sólidos analisados, Cádmio, Chumbo, Alumínio, Bário, Ferro e Manganês (Tabela 26), podem ter sua origem explicada pela utilização de fertilizantes no cultivo, sendo o Cádmio e o Chumbo considerados Metais Potencialmente Perigosos (MOPCs) (GUILHERME et al.,2015).Alguns metais estão presentes nos fertilizantes inorgânicos como contaminantes ou produtos secundários de sua produção, ou seja, não são adicionados propositalmente e não são essenciais para o crescimento da plantação. Já o Ferro e o Manganês são adicionados propositalmente para a adição de micronutrientes para as plantas (GUILHERME et al.,2015).

Porém, são diversas as fontes de contaminação do solo por metais, que posteriormente poderão ser absorvidos pelas plantas (FERNÁNDES,2017), exigindo estudos mais aprofundados sobre os compostos presentes no solo das duas regiões onde os resíduos foram coletados, dos agroquímicos mais comumente utilizados e das atividades industriais presentes para uma melhor avaliação de sua origem. Os metais apresentam pouca degradação e pouca mobilidade no solo, podendo permanecer em camadas mais superficiais e em contato com raízes de plantas por um longo período (SILVA,2015), porém, em solos mais ácidos, apresentam uma maior mobilidade (KIEKENS; COTTENIE,1985).

Essas fontes de contaminação podem ser de origem natural, associados ao processo de intemperismo das rochas e a própria formação e composição química dos solos (GONÇALVES et al., 2008; SELINUS, 2006), mas também de origem antropogênica, como a disposição em área agrícola de biossólidos, que com frequência apresentam teores elevados de Cádmio e Chumbo (KABATA-PENDIAS;PENDIAS, 2000); deposição atmosférica de metais em decorrência da industrialização da região, sendo que em muitas regiões é a principal fonte de entrada de metais em solos agrícolas, devido ao transporte de metais pelo ar na forma

particulada e sua deposição superficial sobre as folhas e no ecossistema (NICHOLSON et al., 2003;ALLOWAY, 1995); a queima de combustíveis fósseis que resulta na dispersão de um grande número de metais ao longo de uma grande área , tais como: Manganês, Cádmio e Bário (ALLOWAY, 1995); a contaminação da água de irrigação; disposição inadequada de resíduos domésticos e industriais, pois, aproximadamente 10% dos resíduos urbanos apresentam metais em sua composição, e quando descartados na superfície podem contaminar as águas subterrâneas (RACHWAŁ et al.,2015). Além disso, a incineração desses resíduos polui a atmosfera com metais voláteis, contaminando por consequência os vários compartimentos do ecossistema (RACHWAŁ et al.,2015) e, por fim, através da utilização de agroquímicos agrícolas, como os já citados fertilizantes, principalmente os fosfatados, os pesticidas e corretivos de acidez do solo (AMARAL-SOBRINHO et al.,1992).

Não foram encontrados estudos anteriores com o objetivo de avaliar o potencial poluidor dos resíduos sólidos oriundos dos cultivos agrícolas do café no meio ambiente e que tenha utilizado esses procedimentos de classificação da normatização atual para a análise. No entanto, Schmidt (2008) quantificou os teores de alguns metais em amostras de grãos de café, provenientes de lavouras do estado do Paraná. Foram examinadas 30 amostras de grãos de café, sendo 15 cultivados em solos de basalto e 15 em solos de arenito. A determinação de Chumbo, Cádmio e Manganês foi realizada por espectrometria de emissão atômica. Para as propriedades em solos basálticos, a concentração média de Chumbo foi de 0,45mg/Kg, de Cádmio foi de 0,08 mg/Kg e de 29,04 mg/Kg para o Manganês. Para as propriedades com solos de arenito as médias encontradas foram de 0,35 mg/Kg para o Chumbo, 0,04 mg/Kg para o Cádmio e de 43,63 mg/Kg para o Manganês. Em cinco propriedades de solo basáltico e três de solo de arenito, as concentrações de Chumbo encontradas foram maiores que 0,5mg/Kg, concentração máxima aceita pela ANVISA (2013) para cereais, porém, Schmidt (2008) ressalta que não existe um valor previsto para os grãos de café. Para o Cádmio, nenhuma das amostras apresentaram valores maiores do que o previsto pela legislação e para o Manganês não existe legislação com padrões de referência para esse elemento.

Silva (2015) analisou 50 amostras de café arábica torrado e moído obtidas em fazendas e em centros de comercialização de café de cidades da região do Alto Paranaíba – MG, para o elemento Chumbo, em apenas uma das amostras não foi encontrado a presença deste metal. O valor médio encontrado foi de 0,747 mg/Kg, sendo que em 37 das amostras de café apresentaram concentrações de Chumbo superiores ao máximo permitido pela ANVISA: RDC

nº 42 de 2013 (0,5 mg/kg), algumas chegando a conter quase o triplo do valor. Por isso, Silva (2015) destaca que nenhuma dessas 37 amostras de café poderiam ser introduzidas no mercado. Para o Manganês, a concentração média encontrada em seu estudo para foi de 19,43 mg/Kg. Para o Cádmio, o limite máximo de 0,1mg/Kg estabelecido pela legislação não foi superado por nenhuma das 10 amostras nas quais esse elemento estava presente, a média do teor de Cádmio encontrada foi de 0,0092 mg/Kg.

O nitrato, por sua vez, é a forma básica de um grande número de fertilizantes nitrogenados, possuindo grande mobilidade no solo e sendo extremamente solúvel na água podendo, assim, facilmente contaminar as águas subterrâneas. É um contaminante que prejudica o abastecimento de água e por essa razão, tem sido uma preocupação mundial (COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL,2007). As principais fontes antropogênicas de contaminação das águas subterrâneas por nitrato são os excrementos de animais, que muitas vezes podem ser utilizados para a fertilização do solo; fertilizantes nitrogenados; efluentes domésticos e disposição de resíduos agroindustriais no solo (CHAPELLE,2000). O excesso é carreado para as águas subterrâneas, rios e lagos, podendo causar a eutrofização (BRAGA et al., 2002). Na eutrofização das águas subterrâneas por contaminação com nitratos está a origem de sérios problemas sociais e econômicos (MORGHI et al., 2015).

A cafeicultura brasileira está implantada, em sua maioria, em solos de baixa fertilidade natural, com predominância de acidez elevada, altos teores de alumínio, o que exige uma adequada fertilização para alcançar elevadas produtividades (MATIELLO et al., 2002). Dentre as principais culturas brasileiras: soja, milho, algodão, cana de açúcar, a cultura de café é a que necessita de maior quantidade de fertilizantes nitrogenados, sendo o nutriente exigido em maior quantidade pelo cafeeiro e aplicado em maior quantidade (FAO-ONU, 2006).

Por fim, os surfactantes são algumas vezes utilizados nos cultivos cafeeiros para aumentar a dispersão, adesão e penetração dos pesticidas, pois reduzem a tensão superficial e melhoram a dispersão na superfície foliar (KISMANN,1998).

Em relação ao compósito produzido, após a incorporação na matriz do polímero do resíduo sólido casca de café obtida pela via seca, apenas três dos seis elementos encontrados no resíduo *in natura* apresentaram resultados acima do limite máximo exigido pela norma para o extrato solubilizado. O Ferro teve sua concentração diminuída para 0,596 mg/L e apesar de

atingir um índice bem próximo ao exigido (0,3 mg/L), ainda não atingiu a concentração estabelecida pela norma. O Manganês e o Nitrato tiveram suas concentrações diminuídas para 1,471 mg/L e 189 mg/L, respectivamente e não apresentaram índices compatíveis com a norma. Esse resultado evidencia a necessidade de se utilizar o painel em condições de ambiente interno e em condições secas, para que esses elementos não sejam solubilizados em água e possam provocar contaminações.

6. CONCLUSÕES

6.1 Capítulo 1 - Avaliação física e mecânica dos painéis produzidos

6.1.1 Parte 1 - Avaliação da influência do tipo de fibra vegetal utilizada: juta, sisal e coco nas propriedades físicas e mecânicas (flexão estática) dos painéis produzidos

Dentre as fibras utilizadas para o reforço dos compósitos, a fibra de coco foi a que apresentou os piores resultados na flexão, pois para as chapas de via úmida, os resultados se compararam com as chapas confeccionadas sem nenhuma fibra e para as chapas de via seca, apesar das fibras de coco terem incrementado o valor do módulo de ruptura, ele afetou negativamente o módulo de elasticidade.

A fibra de sisal apresentou os melhores resultados, para os compósitos de via úmida, ela incrementou as propriedades mecânicas na flexão mais do que as outras fibras e para o módulo de elasticidade, ela não incrementou a propriedade, porém, não a afetou negativamente como aconteceu com as outras duas fibras.

Os compósitos confeccionados com a casca de via seca apresentaram melhor desempenho mecânico na flexão, o que pode ser explicado pela presença do pergaminho em sua composição.

Nenhuma das tipologias atenderam aos requisitos da norma brasileira na flexão estática, dessa forma, novas composições foram testadas. Pela análise granulométrica foi verificado que todas as fibras foram classificadas como fibras curtas e suas extremidades podem ter atuado com ponto de tensão, iniciando trincas.

6.1.2 Parte 2 - Efeito das variáveis de produção (pressão, temperatura, composição da resina, presença de fibra de sisal) nas propriedades físicas e mecânicas dos compósitos produzidos com a casca de café obtida pela via seca

Através do planejamento fatorial realizado concluiu-se que as variáveis composição da resina e temperatura foram as que mais influenciaram no módulo de ruptura na flexão estática (82,93%) e as condições operacionais de maior temperatura, composição da resina de 1:1 e a presença da fibra de sisal, na proporção e geometria estudada, aumentaram o valor dessa propriedade. Porém, as composições $T3^2$ (1:1, com fibra,50 ^oC,2,4 MPa), $T5^2$ (1:1, sem fibra,100^oC,2,4MPa) e $T7^2$ (20,57MPa) (1:1, com fibra, 100^oC,1,2MPa) atenderam ao valor mínimo

estabelecido pela normalização brasileira (11MPa), apesar da tipologia $T3^2$ (16,65MPa) ter sido confeccionada em menores temperaturas e a $T5^2$ (19,16 MPa) sem a presença da fibra de sisal.

Para o módulo de elasticidade na flexão estática os fatores que mais influenciaram foram a composição da resina e a pressão (89,31%). Concluindo que para o incremento do MOE, é desejável a composição da resina na proporção de 1:1 e maiores pressões. Assim como o obtido para o MOR, as tipologias $T3^2$(1276MPa), $T5^2$ (1291,86MPa) e $T7^2$ (1143,24MPa) apresentaram os maiores valores. No entanto, nenhuma das tipologias atendeu ao requisito mínimo desejável para painéis não estruturais para uso em ambientes internos em condições secas (1800MPa). Dessa forma, recomenda-se novos experimentos com um processamento em maiores pressões, se for importante para a utilização do compósito o incremento dessa propriedade mecânica.

Para a adesão interna, todos os compósitos apresentaram um valor bem acima do estabelecido pela regulamentação (0,40MPa), assim como todas a tipologias também atenderam ao valor máximo permitido para o inchamento em espessura (22% em 24h). As variáveis temperatura, presença de fibras e a pressão foram parâmetros operacionais influentes na adesão interna. Conclui-se, que para essa propriedade, as condições operacionais de maior temperatura, composição da resina de 1:1, ausência da fibra de sisal e maior pressão, incrementam os valores de adesão interna. Os compósitos também apresentaram valores compatíveis quando comparados aos painéis convencionais utilizados comercialmente.

6.2 Capítulo 2 - Caracterização Acústica e Térmica dos compósitos produzidos com a casca de café obtida pela via seca

A tipologia $T7^2$ (1:1,100ºC,1,2MPa, com fibra) apresentou um maior coeficiente de absorção sonora e seu desempenho atingiu um valor de pico na faixa de frequência de 1000Hz-1600Hz (α=0,6). O valor médio do coeficiente foi de α=0,35 para a bandas de 1/3 de oitava e de α=0,30 para bandas de oitava.

Os valores de condutividade térmica obtidos pelos compósitos são compatíveis com valores obtidos por chapas aglomeradas de madeira. As quatro tipologias produzidas com uma menor pressão $T7^2$ (1:1,100ºC,1,2MPa, com fibra), $T1^2$(1:1,50ºC,1,2MPa, sem fibra), $T4^2$ (1:1,5;50ºC,1,2MPa, com fibra) e $T6^2$ (1:1,100ºC,1,2MPa, com fibra) apresentaram menores valores de

condutividade sendo iguais a k=0,121W/mK, k=0,143 W/mK, k= 0,143 W/mK e k= 0,144 W/mK, respectivamente.

6.3 Capítulo 3 - Classificação dos resíduos sólidos gerados nas lavouras cafeeiras: casca de via úmida e casca de via seca

As cascas obtidas pelo processamento do café pela via úmida e pela via seca receberam a mesma classificação segundo a norma brasileira NBR ABNT 10004 (2004) – Resíduos Sólidos – Classificação. Ambas foram classificadas como sendo da Classe II A – não perigoso e não inerte, os resíduos não perigosos e não inertes podem ter propriedades tais como: biodegradabilidade, combustibilidade ou solubilidade em água. Porém os compostos que ultrapassaram os limites exigidos por ela no ensaio de solubilização se diferiram. A casca obtida pelo beneficiamento por via seca recebeu essa classificação porque os compostos: Alumínio (2,71 mg/L), Bário (1,37 mg/L), Chumbo (0,04 mg/L), Ferro Total (12,17 mg/L), Manganês (3,11 mg/L) e Nitratos (526 mg/L) ultrapassaram os limites estabelecidos, enquanto que a casca obtida pela via úmida as substâncias Cádmio (0,009 mg/L), Chumbo (0,03 mg/L), Ferro Total (13,38 mg/L), Manganês (0,405 mg/L), Nitratos (90 mg/L) e Surfactantes (1,34 mg/L) que ultrapassaram os limites exigidos.

6.4 Conclusões e considerações finais

Esse trabalho foi importante para avaliar o comportamento do resíduo, das fibras e da resina poliuretana derivada do óleo de mamona em diferentes condições de processo e composições. Além disso, foi avaliado o potencial de contaminação ambiental do resíduo e também foi demonstrada a viabilidade técnica de sua utilização para confecção de novos produtos para utilização na construção civil.

Ao final dos trabalhos experimentais, conclui-se que os painéis produzidos apresentaram potencial de utilização como móveis, forros, divisórias, placas termo acústicas e vedação não estrutural para ambientes internos. Porém, a escolha da melhor tipologia e dos parâmetros operacionais deverá ser efetuada levando em consideração não só o uso escolhido para o compósito, mas também poderá ser avaliada a disponibilidade de matérias primas por uma determinada região.

Por exemplo, as matérias primas utilizadas para a composição do painel de tipologia T7[2], que apresentou uma boa performance acústica e térmica estão todas disponíveis no estado da Bahia. Esse estado possui não somente cultivos cafeeiros, mas também é o responsável pelo cultivo da fibra de sisal e conta com o polo petroquímico de Camaçari. Já para produções no estado de São Paulo e Minas Gerais, a tipologia T5[2] produzida sem a adição de fibras de sisal pode ser uma alternativa mais interessante e investigações com outras fibras disponíveis na região podem ser efetuadas, como por exemplo um painel híbrido de resíduo de café e cana de açúcar.

Em pesquisas futuras, outros ensaios técnicos são necessários para a caracterização completa dos painéis produzidos, destacando principalmente os de segurança contra incêndio. Mas, destaca-se, também, caracterizações de resistência ao ataque químico, resistência à exposição ultravioleta, resistência ao impacto, avaliações relacionadas às variações térmicas (TGA), ensaio acústico em câmara reverberante, determinação do calor especifico, difusidade térmica e emissão de compostos orgânicos voláteis.

Nesse estudo, foi utilizada uma quantidade maior de resina do que estudos conduzidos anteriormente, porque, assim como explicado na metodologia da pesquisa, os painéis aglomerados usados comercialmente geralmente são fabricados com um teor de resina que corresponde de 6% a 15% de sua composição. No entanto, a mistura da resina com as partículas foi realizada de forma manual e uma quantidade maior de resina foi utilizada para tentar garantir que todas as partículas entrassem em contato com esse adesivo, já que o processo manual pode dificultar a interação entre os materiais. Além disso, resíduos como casca de café, casca de amendoim ou macadâmia, por exemplo, tem a desvantagem de serem formados por partículas muito pequenas, o que pode demandar uma maior quantidade de adesivo. No entanto, problemas de ordem financeira decorrentes da utilização de uma maior quantidade de resina, podem no futuro apresentar um menor impedimento se obtiver demandas em maior escala por esse produto e incentivos no cultivo da mamona para aumento de sua produtividade no campo. Também, sugere-se, que em pesquisas futuras seja realizado um novo planejamento fatorial, com as condições de processos aqui estudadas e analisando diferentes quantidades de resina, com o objetivo de encontrar sua composição ótima no compósito.

Ademais, deve-se considerar que é importante que as decisões sejam tomadas após quantificações mais detalhadas depois de uma avalição de todo o ciclo de vida do produto (ACV), pois dessa maneira é possível ter uma resposta ambiental objetiva sobre as perdas e

ganhos ambientais e de saúde humana. Esse aumento da resina pode ser mais interessante do ponto de vista ambiental do que a realização de modificações químicas na superfície das fibras para uma maior adesão da fibra/matriz, por exemplo. Outro exemplo, é em relação a ganhos dos parâmetros de processamento, já que a tipologia $T3^3$ também demonstrou bons resultados mesmo utilizando uma temperatura menor de 50ºC.

Por fim, foi observado que os estudos sobre a resina poliuretana derivada do óleo de mamona estão atualmente mais concentrados nos institutos de pesquisas brasileiros, não havendo, aparentemente, um maior interesse de outros países devido a indisponibilidade do cultivo da mamona em seus territórios. Por esse motivo é importante que novas pesquisas sejam desenvolvidas no país.

7. REFERÊNCIAS

ABRAF. **Brazilian Association of Forest Plantation Producers**. 2013. Yearbook statistical,STCP , Brasília, 2013.

ABREUJR et al. Uso agrícola de resíduos orgânicos potencialmente poluentes,: propriedade químicas do solo e produção vegetal. **Tópicos Ci.Solo**,v.4,p.391-470,2005.

ABU TAYEH,H. et al. Subcritical hydrothermal pretreatment of olive mill solid waste for biofuel production. **Bioresource Technology**.v.199, 164-172.2016.

ACCHAR,W.;DULTRA, E.J.V. Ceramic Materials from Coffee Bagasse Ash Waste, SpringerBriefs in Applied Sciences and Technology,p.23-30,2015.

ALLOWAY, B. J.**Heavy metals in soils**. 2.ed. London: Blackie Academic & Professional, 1995. 368p.

AMARAL-SOBRINHO, N.M.B. et al. Metais pesados em alguns fertilizantes e corretivos.**Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas,v.16,n.2,p.271-276,1992.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **D3878-95**. Standard Terminology for Composite Materials.

ANDERSON, T. L. **Fracture mechanics: fundamentals and applications**. 3.ed. Boca Raton, Florida: CRC Press,2005. 630p.

ARAÚJO,L.C.R. **Contribuição ao estudo dos poliuretanos flexíveis derivados de óleo de mamona determinando suas propriedades físicas e químicas**.1998.Dissertação Mestrado (Instituto de Química de São Carlos)- Universidade de São Paulo,São Carlos,1998

ARAÚJO, I.I. Caracterização físico-mecânica de painéis de partículas de bambu com adição de casca de café. 2015 . 114f.Dissertação de Mestrado (Processos de Fabricação) ,Universidade Estadual Paulista, Bauru,2015.

ARÉVALO-ALQUICHIRE,S.;VALERO, M. Castor Oil Polyurethanes as Biomaterials. Elastomers. (2017) doi:10.5772/intechopen.68597

ARIAS, A. et al. Cradle-to-gate Life Cycle Assessment of bio-adhesives for the wood panel industry. A comparison with petrochemical alternatives. **Science of The Total Environment**,v.738,p.117-123,2020.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 10004. **Resíduos sólidos – classificação**. 2004

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 10005. **Procedimentos para obtenção de extrato lixiviado de resíduos sólidos.**2004

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 10006. **Procedimentos para obtenção de extrato solubilizado de resíduos sólidos**.2004

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 14810: Painéis de partículas de média densidade. Parte 2: Requisitos e métodos de ensaio. Rio de Janeiro: ABNT,2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 14535:Móveis de madeira: Requisitos e ensaio para superfície pintada. Rio de Janeiro:ABNT,2008.

BALDAN,S.J.V. **Desenvolvimento e caracterização de placas poliméricas produzidas a partir da reciclagem do resíduo industrial de poliuretana termofixa**.2015.133f .Dissertação Mestrado (Arquitetura e Urbanismo) – Instituto de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2015.

BARBIRATO,A.H.G. et al. OSB Panels with Balsa Wood Waste and Castor Oil Polyurethane Resin. **Waste and Biomass Valorization**.v.11, p.743–751,2020.

BARTHOLO, G.F. et al. Cuidados na colheita, no preparo e no armazenamento do café. **Informe Agropecuário**, Belo Horizonte, v.14, n.162, p.33-33,1989.

BRASIL. República Federativa do Brasil. LEI nº 12.305, de 02 de agosto de 2010.**Política Nacional de Resíduos Sólidos**. Brasília, 2010

BATISTA,R.R. **Rotas de aproveitamento tecnológico de resíduo orgânico agrícola : casca de coco, casca de cacau e casca de café- destinadas à geração de energia**.2014.108f.Dissertação Mestrado (Energia) – Universidade Federal do Espírito Santo,São Mateus,2014.

BEKALO,S.A.;REINHARDT,H.W.Fibers of coffee husk and hulls for the production of particleboard. Materials and Structures, v.43,p.1049-1060,2010.

BERTOLINI, S.M. **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. Dissertação de mestrado (Ciência e Engenharia de Materiais) ,Universidade de São Paulo, São Carlos,2011.

BERTOLINI,S.M. et al. Particleboards from CCB-Treated Pinus sp. Wastes and Castor Oil Resin: Morphology Analyses and Physical–Mechanical Properties. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 31, n. 11, 2019.

BLEDZKI,A.;GASSAN,J. Composites reinforced with celulose based fibres. Progress in Polymer Science,v.24,n.2,p.221-274,1999.

BORÉM, F. M. **Pós-colheita do café**. Lavras: Editora UFLA, 2008.631 p.

BOUALLAGUI,H. et al. Bioreactor performance in anaerobic digestion of fruit and vegetable wastes. **Process Biochemistry**,v.40, 989-995.2005.

BRAGA,B. et al. Introdução à Engenharia Ambiental. 1. ed. Prentice Hall, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, p.305.2002

BRUM, S.S. **Caracterização e modificação química de resíduos sólidos do beneficiamento do café para produção de novos materiais**.2007.138f.Dissertação Mestrado (Agroquímica) – Universidade Federal de Lavras,Lavras,2007.

BURATTI,C. et al. Sustainable panels with recycled materials for building applications:environmental and acoustic characterization. **Energy Procedia**, v.101,p. 972 – 979,2016.

BURATTI, C. et al.Rice husk panels for building applications: Thermal, acoustic andenvironmental characterization and comparison with other innovative recycled waste materials.**Construction and Building Materials**,v. 171,p.338–349.2018.

CAFEICULTURA.O café e a história do mundo contemporâneo.2007. Disponível em :,https://revistacafeicultura.com.br/?mat=12439> Acesso em:27 dez. 2020.

CARDOSO,T.G.**Caracterização da espuma rígida de poliuretano (PU) derivada de óleo de mamona (Ricinus communis) para isolamento térmico na construção civil**.2010.Dissertação (Mestrado em Interunidades Ciência e Engenharia de Materiais,Universidade de São Paulo,2010.

CASTILHOSJR.A.B. et al. **Gerenciamento de resíduos sólidos urbanos com ênfase na proteção de corpos d`água: Prevenção, Geração e Tratamento de Lixiviados de Aterros Sanitários**. Prosab-Programa de Pesquisa em Saneamento Básico, Florianópolis, Santa Catarina, 2006,1ª edição, editora Sermograf Artes Gráficas e Editora Ltda.475p.

CAVALCANTI, W. S. Compósitos poliéster/tecidos tramados vegetal-vidro: caracterização mecânica e simulação da sorção de água.2006. Tese de Doutorado (Engenharia de Processos), Universidade Federal de Campina Grande - UFCG, Campina Grande, 2006.

CHAPELLE, F.H .. Ground-water microbiology and geochemistry. 2. ed. John Wiley & Sons.477 p.2000.

CHAUD, E. **Reciclagem de Resíduos para a Construção Civil**.Fumec/FEA,Belo Horizonte,2007.

CIANNAMEA, E.M. et. Particleboard based on rice husk: effect of binder contest and processing conditions. **Journal of Renewable Materials**, v.5, n.5, p.357-362,2017.

CIESLINKSKI J.E.F. et al. Emissão de gases poluentes com a queima de casca de café. In: XX Congresso Brasileiro de Engenharia Química, 2014, Florianópolis, **Anais.2014**.

Colli, A et al. Propriedades de chapas fabricadas com partículas de madeira de paricá (Schyzolobium amazonicum Huber ex. Ducke) e fibras de coco (Cocos nucifera L.). **Revista Árvore**,v.34,n.2,p.333-338,2010.

COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL. Relatório de qualidade das águas subterrâneas do Estado de São Paulo: 2004-2006.CETESB,2007

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO .Acomp. safra brasileira de café, v. 5– Safra 2019, n. 2 - Segundo levantamento, Brasília.CONAB,2019. p. 1-61.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. Acomp. safra brasileira de café, v. 6–

Safra 2020, n. 1- Primeiro levantamento, Brasília.CONAB,2020. p. 1-62

CORTEZ,C.L. **Estudo do potencial de utilização da biomassa resultante da pode de árvores para a geração de energia : estudo de caso**. 2011,246f.,Tese (Doutorado) – Pós-Graduação em Energia, Universidade de São Paulo, São Paulo,2011.

CRAVO, J.C.M. Forro ecológico de resíduos agroindustriais para galpões avícolas**. Ciência Rural**, Santa Maria, v.44, n.8, p. 1466-1471, 2014.

CRAVO,J.C.M et al.Compósito à base de resíduos agrícolas para aplicação como forro de aviários. **Brazilian Journal of Biosystems Engineering** v.9,2015.

DAVIS, A. P.et al. Growingcoffee: Psilanthus (Rubiaceae) subsumed on the basis of molecular and morphological data, implications of size, morphology, distribution and evolutionary history of Coffee. Botenical Journal of Rehinneon Society, London, v. 167, p. 1-21, Dec.2011.

DEUTSCHES INSTITUT FUR NORMUNG. DIN 51046: Testing of Ceramic Materials: Determination of Thermal Conductivity up to 1600ºC by the Hot-Wire : Thermal Conductivity up to 2W/mK. (Provisional Standard Part 1.) German,1976.

DODGE, J. **Polyurethanes and Polyureas. Synthetic Methods in Step-Growth Polymers**, p.197–263. 2003.

DULTRA,E.J.V.; ACCHAR,W.**Incorporação de Cinzas da Casca de Café na Produção de Placas Cerâmicas para Revestimentos.**2010.Dissertação Mestrado (PPGEM) –Universidade Federal do Rio Grande do Norte,2010.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Sumário executivo café. EMBRAPA2019.Disponívelem:http://www.sapc.embrapa.br/arquivos/consorcio/informe_estatistico/Sumario_Cafe_Outubro_2019.pdf . Acesso em: 27 dez.2020

ESPÍNDOLA,L.R. **Habitação de interesse social em madeira conforme os princípios de coordenação modular e conectividade**.Dissertação Mestrado (Engenharia Civil) –, Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina,Florianópolis, 2010.

FAO-ONU. Fertilizer **Use by Crop**. FAO. Roma, p. 114. 2006. (ISSN: 0259-2495)

FARIAS, S.W. Transformação dos resíduos lignocelulósicos da cafeicultura em pellets para geração de energia térmica. **Coffe Science**, Lavras, v.11, n.1,p.137-147,jan./mar,2015.

FERNÁNDEZ,H.Z.**Análise de metais pesados em solos de pernanbuco com diferentes atividades antrópicas**.2017.Tese (Doutorado): Programa de Pós-Graduação em Tecnologias Energéticas e Nucleares.Universidade Federal de Pernambuco,2017.

FERNANDES, T. Biodigestor é opção para fertilização sustentável no cafezal.09 out. 2014. Disponível em https://www.cafepoint.com.br/noticias/producao/biodigestor-e-opcao-para-fertilizacao-sustentavel-do-cafezal-91526n.aspx. Acesso em: 05 jan. 2018.

FERREIRA, S.B. **Propriedades físico-mecânicas de painéis de particulados de *Eucalyptys saligna* com adição de casca de noz macadâmia**.2013.80f. Dissertação de mestrado – Unesp,Guaratinguetá, 2013.

FIORELLI, J. 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.401-406,2011.

FIORELLI, J. Multilayer Particleboard Produced with Agroindustrial Waste and Amazonia Vegetable Fibres. **Waste Biomass Valor**.v.9,p.1151-1161, 2018.

FIORELLI,J.;BUENO,B.S;CABRAL,R.M. Assessment of multilayer particleboards produced with green coconut and sugarcane bagasse fibers. **Construction and Building Material**.v. 205, p. 1-9,2019.

GAVIOLI, M.L. Avaliação de ciclo de vida como estratégia ambiental para desenvolvimento de painéis de partículas com subprodutos agroindustriais.2020.Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciências dos Materiais)- Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos, Universidade de São Paulo, Pirassununga,2020.

GONÇALVES, J.R. et al. Determinação de metais pesados em leite integral bovino pasteurizado no estado de Goiás. Ciência Animal Brasileira, v. 9, p. 365-375, 2008.

GUILHERME et al. Metais em Fertilizantes Inorgânicos: Avaliação de Risco à Saúde Após a Aplicação. Edition: 2ª edição Publisher: Editora UFLA ISBN: 978-85-8127-026-5.2015.

HARDWOOD,J.H. Pesquisas para produção de biogás na Amazônia. ACTA AMAZONICA,v.10(2),p.403-409,1980.

HAYKIRI-ACMA, H.;YAMAN,S. **Comparison of the combustion behaviors of agricultural wastes under dry air and oxygen**. World Renewable Energy Congress,2011,Sweden,2011.

HENRARD,A.A et al. **Produção de biogás a partir de biomassa microalga**. Universidade Federal do Rio Grande – FURG, Escola de Química e Alimentos, Laboratório de Engenharia Bioquímica,2007

HYER,M.W. Stress analysis of fiber-reinforced composite materials. Boston: WCB McGraw Hill. 1998.

INSTITUTO CAPIXABA DE PESQUISA, ASSISTÊNCIA TÉCNICA E EXTENSÃO RURAL**. Café Conilon**.2.ed.Vitória: Incaper,2017.784p.

INSTITUTO DE PESQUISA ECONOMICA APLICADA. **Diagnóstico dos Resíduos Orgânicos do Setor Agrossilvopastoril e Agroindústrias Associadas**. Brasília: Governo Federal, 2012.

INTERNATIONAL AGENCY FOR RESEARCH ON CANCER. **Press release 153**.2004

IONESCU,M. Chemistry and technology of polyols for polyurethanes. 1st ed. Shrewsbury: Rapra Technology; 2005

IWAKIRI,S. et al. **Painéis de madeira reconstituída**. Curitiba-PR: Ajir Gráficae Editora Ltda.2005.

JOSEPH, K.; MEDEIROS, E. S.; CARVALHO, L. H. Compósitos de matriz poliéster reforçados por fibras curtas de sisal. **Polímeros**. v. 9, n. 4, p. 136-141, São Carlos, 1999.

KABATA-PENDIAS,A.;PENDIAS,H. **Trace elements in solis and plants**,4.ed.Boca Raton: CRC Press,13p.2000.

KISSMANN,K.G.Adjuvantes para caldas de produtos fitossanitários. In: GUEDES,J.VC & DORNELLES,S.B (Org). **Tecnologia e segurança na aplicação de agrotóxicos: novas tecnologias**.Santa Maria: Departamento de Defesa Fitossanitária; Sociedade de Agronomia de Santa Maria,p.39-51,1998.

KLINGEL et al. A Review of Coffee By-Products Including Leaf, Flower, Cherry, Husk, Silver Skin, and Spent Grounds as Novel Foods within the European Union. **Foods**. V.9,n5,p.665, may,2020.< doi: 10.3390/foods9050665>

KIEKENS,L.;COTTENIE,A. **Principles of investigations on the mobility and plant uptake of heavy metals**. In: Ieschber,r.;davis,r.d.l´hermite,p.eds. Chemical methods for assesing bio-available metals in sludges and soils.New York: Elsevier.p.21-32.1985.

KOK,M.V; OZGUR,E. Thermal analysis and kinetics of biomass samples. **Journal. Fuel Processing Tchnology**, Ankara, Turkey, 2013.

LACOMBE,A.E.J. Painéis de madeira aglomerada produzidas com resíduos de serragem e poliestireno expandido para aplicações na construção civil.2015. 193 f. Tese (Doutorado).Instituto de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2015.

LIMA, P.W. Impacto ambiental das florestas plantadas.2004. Disponível em: http://www.cpamn.embrapa.br/agrobioenergia/palestras/IMPACTO%20AMBIENTAL%20DAS%20FLORESTAS%20PLANTADAS%20.PDF. Acesso em 05 fev.2018.

MALLICK, P. K. **Fiber - reinforced composites: materials, manufacturing, and design**. 3ed.Taylor and Francis Group, New York, 2007.

MALONEY,T.M. Modern particleboard and dry-process fiberboard manufacturing. California,Miller Freeman Publications.672p.1977.

MARTINS, E.H. et al. Soybean waste in particleboard production. **Ciência e agrotecnologia**, v.42 , n.2 , p.186-194,2018.

NICHOLSON, F.A. et al. An inventory of heavy metals inputs to agricultural soils in England and Wales. **Science of the Total Environment**, Amsterdam, v.311, n.1-3, p.205-219,2003.

RODRIGUES,M.R.P. Caracterização e utilização do resíduo de borracha de pneus inservíveis em compósitos aplicados na construção civil. Tese (Doutorado). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos,2008

MASSUKADO, M.L.**Desenvolvimento do processo de compostagem em unidade descentralizada e proposta de software livre para o gerenciamento municipal dos resíduos sólidos domiciliares.** Tese (Doutorado) – Ciências da Engenharia Ambiental – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos,2008

MATHIAS, J.D; GREDIA, M. MICHAUD, D. J. Bio-based adhesives. **Biopolymers and Biotech Admixtures for Eco-Efficient Construction Materials**,369-385.2016.

MATIELLO, J.B.et al.. **Cultura de café no Brasil: novo manual de recomendações**. Rio de Janeiro: MAPA/PROCAFÉ, 2002. 387p.

MATIELLO, B.J. **O café do cultivo ao consumo**. São Paulo: Globo, 1991,p.320.2005.

MATIELLO, B.J. Palha de café deve ser aplicada e não amontoada,15 dez. 2016. Disponível em: https://www.cafepoint.com.br/radares-tecnicos/folha-procafe/palha-de-cafe-deve-ser-aplicada-e-nao-amontoada-103327n.aspx?r=2090830840#. Acesso em: 05 fev. 2018.

MATOS T.A.;SANTOS,J.H.;FIA R. Contaminação do solo em áreas de depósito de cascas de frutos do cafeeiros. In: I SIMPÓSIO DE PESQUISA DOS CAFÉS DO BRASIL,2000, Poços de Caldas.**Anais.**Brasília, DF: EMBRAPA CAFÉ/MINASPLAN,2000.p.981-984.

MELO, F.A.O. et al. Avaliação da utilização da palha de café para aproveitamento indireto de ar para secagem de produtos agrícolas. Engenharia na Agricultura, Viçosa, MG,V.13,N.1,49-54,jun/mar.,2005.

MENDES, F.R. Effect of the incorporation of coffee husks on the physico-mechanical properties of Eucalyptus urophylla S.T. Blake particle particleboards. **Ciênc.agrotec**, Lavras,v.34,n.3,p.610-617, mai./jun.,2010

MESQUITA,M.C.et al. Manual do Café: Colheita e Preparo (Coffea arábica L.). Belo Horizonte.Emater-MG .2016.

MESQUITA,A.G.R. et al. Coir and Sisal Fibers as Fillers in the Production of Eucalyptus Medium Density Particleboards - MDP. **Mat. Res. [online]**, v.19, n.6, p. 1429-1436. 2016.

MOHANTY,A.;MISRA,M.;DRZAL,L. Sustainable bio-composites from renewable resources: opportunities and challenges in the green materials world. **Journal of Polymers and the Environment**,v.10,n.10,n.1-2,p.19-26,2002.

MORESCHI, J. C. **Propriedades tecnológicas da madeira**. Departamento de Engenharia e Tecnologia Florestal, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2012.

MORGHI, M et al. Removal of nitrate ions from aqueous solution using chitin as natural adsorbent. **International Journal of Research in Environmental Studies**, v. 2, p. 8-20, 2015.

NASCIMENTO, F.M. et. al. Homogeneous particleboards manufactured with lignocellulosic waste and alternative resin for floor application. **Scintia Forestalis** . v.44,n112,p.1001-1007, Piracicaba, dez,2016.

NAIR, M.; THOMAS, K. GROENINCKX,G. Thermal and dynamic mechanical analysis of polystyrene composites reinforced with short sisal **fibres. Composites Science and Technology**, v.61, n.16,p. 2519–2529.2001.

NASCIMENTO,M.F. **CPH- Chapas de partículas homogêneas- madeiras do Nordeste do Brasil**.2002.Tese (Doutorado).Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos,2003.

PASSO, A.R.P. **Destinação sustentável de cascas de coco *(Cocos nucifera)* verde: obtenção de telhas e chapas de partículas**. 2005. Dissertação de Mestrado (Planejamento Energético), Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro,2005.

PAUL, S. A. et al. Effect of fiber loading and chemical treatments on thermophysical properties of banana fiber/polypropylene commingled composite materials. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, v. 39, n.9, p. 1582-1588, 2008.

PAULA R.J.**Mineralização de resíduos orgânicos no solo em condições de campo**.2012.80f. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Viçosa,Viçosa,2017.

PEREIRA, L. H. P. **Estudo das propriedades físicos-químicas da poliuretana derivada do óleo de mamona com potencial aplicação da área médica**. 2010. Dissertação de Mestrado. – Instituto de Química de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2010.

PEREIRA, V.M.F; PEREIRA-FILHO, R.E. Aplicação de programa computacional livre em planejamento de experimentos: um tutorial. **Quim. Nova**, v. 41, n. 9, p.1061-1071, 2018.

PIEKARSKI, C.M. et al. Life cycle assessment of medium-density fiberboard (MDF) manufacturing process in Brazil. **Science of The Total Environment**, v. 575, p. 103-111,2017.

PIGATIN, F.B.L. **Estudo químico e espectroscópio da dinâmica da vermicompostagem de resíduos agroindustriais para manejo sustentável em agricultura orgânica**.2017.226f. Dissertação de Mestrado (Química Analítica e Inorgânica) – Instituto de Química de São Carlos, Universidade de São Paulo , São Carlos, 2017.

PIZZI, A.; MITTAL, L.K. **Handbook of Adhesive Technology**.3.ed. Boca Raton:Taylor and Francis,2017.658 p.ISBN 9781315120942.

POLETTO, M. et al. Influência do comprimento das fibras nas propriedades mecânicas e térmicas de compósitos de poliestireno e fibras de sisal. *In*: **Anais do décimo congresso de polímeros.** Foz do Iguaçu,2009.

QUIRINO, G.M. **Estudo de matriz polimérica produzida com resina natural e fibra da semente de açaí (Euterpe precatória)**.2010. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Amazonas,Manaus,2010.

RACHWAL, M. et al.Coke industry and steel metallurgy as the source of soil contamination by technogenic magnetic particles, heavy metals and polycyclic aromatic hydrocarbons.**Chemosphere**, v.138, p.863–873.2015.

RATTAN,S. et al. A comprehensive review on utilization of wastewater from coffee processing. **Environ Sci Pollut Res**, v. 22, p. 6461–6472,2015.

REUTERS. Brasil precisa elevar em 40% safra de café até 2030 para garantir dominância , diz OIC.,23 nov.2017. Disponível em: http://www.cnabrasil.org.br/noticias/brasil-precisa-elevar-em-40-safra-de-cafe-ate-2030-para-garantir-dominancia-diz-oic. Acesso em: 04 jan.2018.

RICCIARDI,P. Environmental characterisation of coffee chaff, a new recycled material for building applications. **Construction and Building Materials**.v.147,p.185–193,2017.

RIVELA, B. et al. Life Cycle Inventory of Particleboard: A Case Study in the Wood Sector (8 pp). **The International Journal of Life Cycle Assessment**, v.11,n.2,p. 106–113.2016.

RODRIGUES, M.R.P. Caracterização e utilização do resíduo de borracha de pneus inservíveis em compósitos aplicados na construção civil. Tese (Doutorado). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos,2008.

ROWEL,M.R. **Handbook of wood chemistry and wood composites**. 1.ed.Boca Raton : Taylor and Francis,2005.

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

SCATOLINO et al.V.M Eucalyptus wood and coffee parchment for particleboard production: Physical and mechanical properties .**Ciência e Agrotecnologia**,v. 41,n.2,p.139-146,2017.

SELINUS, O. Geologia Médica. In: SILVA, C. R.; FIGUEIREDO, B. R.; DE CAPITANI, E. M.; CUNHA, F. G. **Geologia médica no Brasil: efeitos dos materiais e fatores geológicos na**

saúde humana, animal e meio ambiente. Rio de Janeiro: CPRM - Serviço Geológico do Brasil,p. 1-5.2006.

SHARMA,S.K. **Effect of Particle Size on Biogas Generation from Biomassa Residues**,1988.

SCHMIDT, C.A.P. **Caracterização qualitativa, química e microbiológica de cafés de solos de basalto e arenito**.2008.Tese (Doutorado em Agronomia - área de concentração Fitotecnia) – Curso do Pós-graduação em Agronomia, Universidade Estadual de Londrina, Londrina.2008.

SILVA, A.J.P. Aplicação de partículas longas e orientadas de bagaço de cana de açúcar na produção de painel particulado similar ao OSB. 2006. 167f. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo , São Carlos , 2006

SILVA A.J.P. et al.Life cycle assessment of médium density particleboard (MDP) produced in Brazil. **Journal of Life Cycle Assessment**, v.18, p.1404-1411,2013.

SILVA, D.A.L et al. Life cycle assessment of the sugarcane eleetricity generation in Brazil. **Renew and Sustainable Energy Reviews**, v.32,p.532-547,2014.

SILVA, A.S.da. **Determinação de elementos tóxicos em café: grãos torrados e em infusão**. Dissertação de Mestrado: Agronomia e produção vegetal.2015. Universidade Federal de Viçosa, Rio Paranaíba,2015.

SILVA, V.R. **Compósito de resina poliuretano derivada do óleo de mamona e fibras vegetais**. 2003.Tese (Doutorado) - Interunidades em Ciências e Engenharia de Materiais, Universidade de São Paulo, São Carlos,2003.

SOLT, P. et al.Technological performance of formaldehyde-free adhesive alternatives for particleboard industry. **International Journal of Adhesion and Adhesives**,v.94,p.99-131, Oct.2019.

THE COFFE TRAVELLER. Sobre o fox bean e outras lendas.04 set.2015. Disponível em: http://www.thecoffeetraveler.net/new-blog-3/tag/Caf%C3%A9.Acesso em: 23 jan. 2012.

TOCK, J.Y., et al. Banana biomass as potential renewable energy resource : A Malaysian case study. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**,v.14,p.798-805,2010.

VILAR,W.D.,**Química e tecnologia dos poliuretados**. 3a Ed.,Vilar Consultoria, Rio de Janeiro.2004.Disponível em : poliuretanos.com.br. Acesso em: 09 ago.2020.

VILLA-MONTOYA,C.A; FERRO, T.I.M.;de OLIVEIRA,A.R. Removal of phenols and methane production with coffee processing wastewater supplemented with phosphorous. International Journal of Environmental Science and Technology, v. 14, n. 1, p. 61-74,2017.< http://dx.doi.org/10.1007/s13762-016-1124-y>

VILLA-MONTOYA, A.C. **Avaliação das características físico-químicas e microbiológicas da produção de hidrogênio e homocetogênese a partir dos resíduos do processamento de café**. 2019. Tese (Doutorado)- Engenharia Hidráulica e Saneamento , Universidade de São Paulo,São Carlos,2019.

VISWANATH, P. et al. Anaerobic digestion of fruit and vegetable processing wastes for biogás production. **Bioresourse Technology**,v.40,p.43-48,1992.

WANG, J.;HU, Y. Novel Particleboard composites made from coir fiber and waste banana stem fiber. **Waste and biomass valorization**, v.7, n.6, p.1447-1458,2016.

WECHSLER, A et al. Macadamia (Macadamia integrifolia) shell and castor (Rícinos communis) oil based sustainable particleboard: A comparison of its properties with conventional wood based particleboard. **Materials and Design**, v.50,p.117-123, Sep.2013.

WIECHETECK,M. **Aproveitamento de resíduos e subprodutos florestais. Alternativas tecnológicas e propostas de políticas ao uso de resíduos florestais para fins energéticos**. Sumário executivo – MMA – secretaria de biodiversidade e florestas,Pnudbra 00/20, 2009.

WIEDMAN,G.A. Fibra de coco e resinas de origem vegetal para produção de componentes de mobiliário e da construção civil.2002.118 f. Tese (Doutorado).Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Paulo,2002.

YANG,M; ROSENTRATER,K.A. 2019b. Life cycle assessment and techno-economic analysis of pressure sensitive bio-adhesive production. **Energies**, v.12,2019.

ZHANG,C.Recent advances in vegetable oil-based polymers and their composites. **Progress in Polymer Science**,v.71,p.91-143,2017.