

HUMBERTO FABRIZZI DE FIGUEIREDO PUPO

**VIABILIDADE TÉCNICA DA PRODUÇÃO DE COMPÓSITOS FIBRA-
POLÍMERO À BASE DE RESÍDUOS**

Botucatu

2017

HUMBERTO FABRIZZI DE FIGUEIREDO PUPO

**VIABILIDADE TÉCNICA DA PRODUÇÃO DE COMPÓSITOS FIBRA-
POLÍMERO À BASE DE RESÍDUOS**

Tese apresentada à Faculdade de Ciências Agrônômicas da UNESP – Câmpus de Botucatu, para obtenção do título de Doutor em Agronomia (Energia na Agricultura).

Orientador: Prof. Dr. Alcides Lopes Leão

Coorientador: Prof. Dr. Adriano Wagner Ballarin

Botucatu

2017

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA SEÇÃO TÉCNICA DE AQUISIÇÃO E TRATAMENTO DA INFORMAÇÃO - DIRETORIA TÉCNICA DE BIBLIOTECA E DOCUMENTAÇÃO - UNESP - FCA - LAGEADO - BOTUCATU (SP)

N984v Pupo, Humberto Fabrizzi de Figueiredo, 1982-
Viabilidade técnica da produção de compósitos fibra-polímero à base de resíduos / Humberto Fabrizzi de Figueiredo Pupo. - Botucatu : [s.n.], 2017
159 p. : fots. color., grafs. color., ils. color., tabs.

Tese (Doutorado) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agrônômicas, Botucatu, 2017

Orientador: Alcides Lopes Leão

Coorientador: Adriano Wagner Ballarin

Inclui bibliografia

1. Cascas. 2. Eucalipto. 3. Arroz. 4. Compósitos poliméricos. 5. Polipropileno. 6. Processo de extrusão. I. Leão, Alcides Lopes. II. Ballarin, Adriano Wagner. III. Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho" (Câmpus de Botucatu). Faculdade de Ciências Agrônômicas. IV. Título.

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA TESE: VIABILIDADE TÉCNICA DA PRODUÇÃO DE COMPÓSITOS FIBRA-POLÍMERO À BASE DE RESÍDUOS

AUTOR: HUMBERTO FABRIZZI DE FIGUEIREDO PUPO

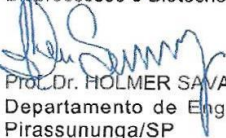
ORIENTADOR: ALCIDES LOPES LEÃO

COORIENTADOR: ADRIANO WAGNER BALLARIN

Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de Doutor em AGRONOMIA (ENERGIA NA AGRICULTURA), pela Comissão Examinadora:



Prof. Dr. ALCIDES LOPES LEÃO
Bioprocessos e Biotecnologia / Faculdade de Ciências Agrônomicas - UNESP



Prof. Dr. HOLMER SAVASTANO JUNIOR
Departamento de Engenharia de Alimentos / Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos - Pirassununga/SP



Profa. Dra. SILVIA REGINA LUCAS DE SOUZA
Dep de Engenharia Rural / Faculdade de Ciências Agrônomicas - UNESP



Prof. Dr. DERVAL DOS SANTOS ROSA
Centro de Engenharia, Modelagem e Ciências Sociais Aplicadas / Universidade Federal do ABC



Profa. Dra. CARLA DOS SANTOS RICCARDI
Depto. de Bioprocessos e Biotecnologia / FCA/Botucatu - Unesp

Botucatu, 03 de março de 2017

DEDICATÓRIA

Em primeiro lugar a Deus, por nos conceber a vida.

Aos meus queridos pais Trajano e Maria José (*in memorian*) que me educaram e me ensinaram a discernir entre o certo e o errado. Por esse motivo eu me tornei uma pessoa do bem e disposto a fazer o bem. Este trabalho é uma das realizações de que quero me orgulhar por estar fazendo algo de bom ao meio ambiente e para nós, seres humanos.

À minha esposa maravilhosa que sempre esteve comigo, me apoiando e ajudando em todos os momentos. Pela sua dedicação em tudo, ajuda prestada e compreensão à minha ausência para dedicar-me a este trabalho.

Aos meus irmãos, sempre dispostos a ajudar, minha querida avó (*in memorian*), meus amigos e demais familiares.

A todas as pessoas que sempre me incentivaram e ajudaram de forma direta ou indireta, apoiando meu modo de pensar com relação à proteção do meio ambiente e ao aproveitamento de resíduos para a criação de novos materiais que não agridam o NOSSO meio de vida.

E a todas as pessoas que, assim como eu, acreditam que, se cada um fizer a sua parte, possamos fazer com que o mundo se torne um lugar mais justo e ambientalmente desenvolvido.

AGRADECIMENTOS

À Faculdade de Ciências Agronômicas (FCA) da Universidade Estadual Paulista (UNESP).

Ao professor Alcides Lopes Leão, meu orientador, pela amizade, ensinamentos transmitidos e por disponibilizar seu laboratório para o desenvolvimento deste trabalho.

Ao coordenador da Pós-graduação em Agronomia (Energia na Agricultura), da Faculdade de Ciências Agronômicas, prof. Adriano Wagner Ballarin, meu co-orientador, meu muito obrigado pelas dúvidas esclarecidas, apoio e compreensão.

Às colegas Daniele Chiarelli e Djanira Negrão do Laboratório de Resíduos Sólidos e Compósitos (Laboratório RESIDUALL – FCA/UNESP – Botucatu/SP) pela ajuda e companheirismo.

A todos os amigos e colegas que passaram pelo laboratório RESIDUALL durante o período do meu doutorado.

Ao técnico Carlos Roberto do Laboratório RESIDUALL, pela ajuda laboratorial.

Ao técnico Ailton, do Laboratório de Ensaio de Materiais, do Departamento de Engenharia Rural da Faculdade de Ciências Agronômicas, da UNESP, Câmpus de Botucatu, pela grande ajuda nos ensaios mecânicos e por sempre estar disposto a cooperar.

Ao pessoal da manutenção, pelos consertos e quebra-galhos no laboratório.

Ao meu cunhado Michel de Castilhos, pelo auxílio nas análises dos dados estatísticos.

Às secretárias do Departamento de Pós-graduação, pelo excelente atendimento e pelas dúvidas sempre esclarecidas.

Ao pessoal da biblioteca da FCA-UNESP, pela gentileza no atendimento.

Aos alunos, professores e funcionários dos Departamentos de Engenharia Rural e Engenharia de Bioprocessos e Biotecnologia.

Ao Sr. Antonio Pegorer, Gerente Comercial da empresa Guacira Alimentos LTDA, situada em Santa Cruz do Rio Pardo-SP, pela doação das cascas de arroz.

À Empresa Café Tesouro, situada em Botucatu-SP, pela doação dos seus resíduos - embalagens de café (BOPP).

Às funcionárias da limpeza do Departamento de Engenharia de Bioprocessos, por deixarem sempre tudo limpo e organizado.

A todos os funcionários da FCA, que de maneira direta ou indireta participaram na elaboração deste trabalho.

Agradeço à CAPES, pela concessão da bolsa de doutorado.

Aos professores Juliano Fiorelli e Holmer Savastano e ao técnico Diego Luis Ferrari da FZEA-USP-Pirassununga, por serem tão gentis, disponibilizarem seu laboratório e executarem o ensaio para avaliação da condutividade térmica dos meus tratamentos.

Ao professor Antonio C. Maringoni e ao assistente de suporte acadêmico José Marcelo Soman do Departamento de Proteção Vegetal, pela ajuda e por disponibilizarem seu laboratório para utilização do microscópio.

E a todos que colaboraram para a realização desta pesquisa.

A todos, muito obrigado!

RESUMO

A utilização dos resíduos sólidos como matéria-prima pode diminuir consideravelmente a extração de recursos naturais, diminuindo assim o impacto sobre o meio ambiente. Dentre os resíduos, os plásticos estão entre os que mais apresentam problemas, pois, mesmo quando descartados corretamente nos aterros sanitários, causam danos ao formarem uma camada impermeável que dificulta a compactação do lixo, afetando as trocas de líquidos e gases gerados e reduzindo a eficiência do processo de biodegradação da matéria orgânica. Diante dos problemas, este trabalho teve por objetivos avaliar a viabilidade técnica de utilização de dois tipos de processos: a extrusora dupla rosca e o misturador termocinético (Drais), na produção de compósitos de BOPP (Polipropileno Biorientado metalizado), reforçados com resíduos de cascas, de eucalipto (CE) e de arroz (CA). Das misturas entre esses resíduos, foram confeccionados 10 tratamentos, de onde se extraíram os corpos de provas, moldados por injeção. Foram avaliadas as propriedades mecânicas (flexão – módulo de ruptura-MOR e módulo de elasticidade-MOE, resistência à tração, resistência ao impacto e dureza Shore D), térmicas (avaliação da condutividade térmica e isolamento térmico), termomecânica (temperatura de deflexão sob aquecimento-HDT) e morfológica, com microscópio estéreo e aumento de 50 vezes para analisar a estrutura interna do corpo de prova, depois de fraturado pelo ensaio de impacto. Para análise das propriedades mecânicas dos corpos de provas, foram utilizadas como referência as normas ASTM D638-14, ASTM D790-10, ASTM D256-10 e a ASTM D-2240-15, para os ensaios de tração, flexão, impacto e dureza Shore D, respectivamente. Para as análises térmicas foi utilizada a norma ASTM E1530-11. Para o HDT, foi utilizada a norma ASTM D648-16. Os resultados mostraram influência de todos os parâmetros analisados nas propriedades dos compósitos. O uso de reforço (CE e CA) nos dois tipos de processos melhorou as propriedades de flexão e de resistência à tração em relação à matriz sem reforço e piorou as propriedades de resistência ao impacto e de dureza Shore D. Com relação à matriz sem reforço, a extrusora mostrou influência no ensaio de resistência à tração. Para adição de casca de eucalipto, o misturador termocinético (Drais) mostrou influência no ensaio de MOE. Já para adição de casca de arroz, a drais mostrou influência nos ensaios de flexão – MOR e MOE e na resistência à tração. Houve melhor adesão entre fibra e matriz nos compósitos confeccionados por extrusão em relação aos confeccionados na drais. As CE apresentaram melhor adesão com a matriz, em relação às CA. Os vazios – bolhas de ar foram observados em todos os tratamentos, com exceção dos tratamentos com ausência de reforço (BOPP 100). Esses vazios foram observados em maior proporção nos compósitos com CE em relação aos compósitos com CA, e também nos compósitos processados na extrusora em relação à drais. Os melhores resultados foram obtidos utilizando o misturador termocinético (Drais) e para as maiores proporções de cascas usadas ou na ausência delas. Porém, pelo fato de o processo utilizado na Drais ser por batelada, a extrusora se torna mais eficiente, levando em consideração o rendimento da produção. Os melhores resultados foram com a utilização de casca de eucalipto. Para os ensaios de flexão MOR, MOE e de resistência à tração, apresentaram interação entre os processos e os resíduos testados. Confirmou-se a viabilidade técnica de utilização de resíduos sólidos industriais (BOPP e CE) e agroindustrial (CA) na produção de compósitos fibra-polímero, sendo que o controle dos processos utilizados é fundamental para a qualidade do produto final.

Palavras-chave: compósitos, resíduos, polipropileno biorientado aluminizado - BOPP, cascas de eucalipto e de arroz, extrusora dupla rosca, misturador termocinético Drais.

ABSTRACT

The use of solid waste as raw material can considerably reduce the extraction of natural resources, thus reducing the impact on the environment. Among residues, plastics are among the most problematic ones because, even when they are properly disposed in landfills, they cause damage by forming a barrier layer which makes it difficult to compact the garbage, affecting the exchange of generated liquids and gases, reducing the efficiency of the biodegradation process of the organic matter. Before such problems, the objective of this work was to evaluate the technical feasibility of two types of processes, the double screw extruder and the thermokinetic mixer - dryer, in the production of BOPP (Bioriented metallized Polypropylene) composites, strengthened by residues of barks eucalyptus (CE) and rice (CA). From the mixtures among these residues 10 treatments have been prepared, from where the test bodies were extracted, molded by injection. Mechanical properties (flexure-rupture modulus-MOR and elasticity modulus-MOE, tensile strength and impact strength towards Shore D hardness), as well as thermal (thermal conductivity and thermal insulation evaluation), thermo-mechanical (heat deflexion temperature-HDT) and morphological characteristics have been evaluated by using a stereo microscope and 50x magnification to analyze the internal structure of the test body, after being fractured by the impact test. For analyzing the mechanical properties of the proof bodies the standards ASTM D638-14, ASTM D790-10, ASTM D256-10 and ASTM D-2240-15 have been used as a reference for tensile, bending, impact and Shore D hardness tests, respectively. For the thermal analyzes, the ASTM E1530-11. For the HDT the ASTM D648-16 standard was used. The results showed the influence from all the analyzed parameters on the composites properties. The use of reinforcement (CE and CA) in both types of processes have improved the flexure and tensile strength properties in relation to the non-reinforced matrix and has worsened the impact strength properties as well as the Shore D hardness. Concerning the non-reinforced matrix, the extruder showed influence on the tensile strength test. For the addition of CE, the thermokinetic mixer - dryer has showed influence in the flexure modulus test. As for rice husk addition, dryer has showed influence in flexure (stress tests on maximum strength-MOR and elasticity modulus-MOE and tensile strength). There was a better adhesion between fiber and matrix, in the composites made by extrusion, compared to those made in the dryer. The CE has shown better adhesion with the matrix, compared to CA. The voids - air bubbles have been observed in all treatments with no reinforcement (BOPP 100). These voids have been more often observed in composites with CE, compared to the composites with CA and also in composites processed in the extruder, in relation to the dryer. The best results were obtained by using the thermokinetic mixer - dryer and for the largest proportions of the barks or in their absence. However, because the process used in Drais is by batch, the extruder becomes more efficient, taking into account the yield of the production. The best results have been from the use of CE. For flexure - MOR and MOE and tensile strength, there was an interaction among the processes and the tested residues. The technical feasibility of the use of industrial solid wastes (BOPP and CE) and agroindustrial (CA) in the production of fiber-polymer composites has been confirmed, and the control of the processes used is fundamental for the quality of the final product.

Keywords: composites, residues, Bioriented aluminized Polypropylene, eucalyptus barks and rice husks, double screw extruder, thermokinetic mixer Dryer.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Displays fabricados com embalagens de salgadinhos (BOPP).....	35
Figura 2 - Pallets fabricados com embalagens de salgadinhos (BOPP).....	35
Figura 3 - Troncos de eucaliptos (cascas)	37
Figura 4 - Constituição do grão de arroz	39
Figura 5 - Representação esquemática de compósitos reforçados com fibras: (a) contínuas e alinhadas; (b) descontínuas e alinhadas; (c) descontínuas aleatórias	43
Figura 6 - Fluxograma das etapas do trabalho.....	55
Figura 7 - Embalagem de café aluminizada (BOPP).....	56
Figura 8 - Casca de Eucalipto (CE)	57
Figura 9 - Cascas de arroz (CA)	57
Figura 10 - Moinho granulador	58
Figura 11 - Casca de Eucalipto (CE) moída	59
Figura 12 - Misturador termocinético (Drais)	60
Figura 13 - Processo de homogeneização das embalagens de café no misturador termocinético	60
Figura 14 - Balança determinadora de umidade	61
Figura 15 - Plastômetro capilar	62
Figura 16 - Peneira vibratória.....	64
Figura 17 - Processo de homogeneização dos Tratamentos 8, 9 e 10	66
Figura 18 - Processo de extrusão.....	67
Figura 19 - Moldagem dos corpos de prova por injeção	68
Figura 20 - Ilustração do processo de prensagem a quente	69
Figura 21 - Ensaio de tração	70
Figura 22 - Ensaio de flexão.....	71
Figura 23 - Ensaio de resistência ao impacto Izod	73
Figura 24 - Ensaio de dureza Shore D	74
Figura 25 - Equipamento DTC 300 e processo para avaliação da condutividade térmica	75
Figura 26 - Microscópio estéreo	76
Figura 27 - Ensaio de HDT.....	77
Figura 28 - Casca de eucalipto com 3,35 mm	84
Figura 29 - Casca de eucalipto com 2 mm	84
Figura 30 - Casca de eucalipto com 1 mm	85

Figura 31 - Casca de eucalipto com 0,85 mm.....	85
Figura 32 - Casca de eucalipto com 0,5 mm.....	86
Figura 33 - Casca de eucalipto com 0,425 mm.....	86
Figura 34 - Casca de eucalipto com 0,250 mm.....	87
Figura 35 - Casca de eucalipto com 0,212 mm.....	87
Figura 36 - Casca de eucalipto 0,125 mm.....	88
Figura 37 - Casca de eucalipto com 0,105 mm.....	88
Figura 38 - Casca de eucalipto de fundo de peneira	89
Figura 39 - Casca de arroz com 3,35 mm	90
Figura 40 - Casca de arroz com 2 mm	90
Figura 41 - Casca de arroz com 1 mm	91
Figura 42 - Casca de arroz com 0,85 mm	91
Figura 43 - Casca de arroz com 0,5 mm	92
Figura 44 - Casca de arroz com 0,425	92
Figura 45 - Casca de arroz com 0,250 mm	93
Figura 46 - Casca de arroz com 0,212 mm	93
Figura 47 - Casca de arroz com 0,125 mm	94
Figura 48 - Casca de arroz com 0,105 mm	94
Figura 49 - Casca de arroz de fundo de peneira.....	95
Figura 50 - Frequência da distribuição granulométrica do tamanho das partículas de CE e de CA	96
Figura 51 - 90% matriz + 10% reforço (CE). Processo: extrusora + injetora. Tratamento 2: BOPP 90 + CE 10	99
Figura 52 - 90% matriz + 10% reforço (CA). Processo: extrusora + injetora. Tratamento 5: BOPP 90 + CA 10.....	100
Figura 53 - 80% matriz + 20% reforço (CE). Processo: extrusora + injetora. Tratamento 3: BOPP 80 + CE 20	101
Figura 54 - 80% matriz + 20% reforço (CA). Processo: extrusora + injetora. Tratamento 6: BOPP 80 + CA 20.....	102
Figura 55 - 70% matriz + 30% reforço (CE). Processo: extrusora + injetora. Tratamento 4: BOPP 70 + CE 30	104
Figura 56 - 70% matriz + 30% reforço (CA). Processo: extrusora + injetora. Tratamento 7: BOPP 70 + CA 30.....	104

Figura 57 - 70% matriz + 30% reforço. Processo: misturador termocinético Drais + injetora. Tratamento 9: BOPP 70 + CE 30	106
Figura 58 - 70% matriz + 30% reforço. Processo: misturador termocinético Drais + injetora. Tratamento 10: BOPP 70 + CA 30.....	106
Figura 59 - Matriz sem reforço. Tratamento 1: BOPP 100. Processo: extrusora + injetora...	108
Figura 60 - Matriz sem reforço. Tratamento 8: BOPP 100. Processo: misturador termocinético Drais + injetora	108
Figura 61 - 70% matriz + 30% reforço (CE). Tratamento 4: BOPP 70 + CE 30. Processo: extrusora + injetora.....	109
Figura 62 - 70% matriz + 30% reforço (CE). Tratamento 9: BOPP 70 + CE 30. Processo: Drais + injetora	110
Figura 63 - 70% matriz + 30% reforço (CA). Tratamento 7: BOPP 70 + CA 30. Processo: extrusora + injetora.....	111
Figura 64 - 70% matriz + 30% reforço (CA). Tratamento 10: BOPP 70 + CA 30. Processo: Drais + injetora	112
Figura 65 - Gráfico dos resultados do ensaio de flexão – módulo de ruptura (MOR), em função de níveis de CE e de CA nos compósitos	128
Figura 66 - Gráfico dos resultados do ensaio de flexão – módulo de elasticidade (MOE), em função de níveis de CE e de CA nos compósitos	130
Figura 67 - Gráfico dos resultados do ensaio de tração, em função de níveis de CE e de CA nos compósitos	132
Figura 68 - Gráfico dos resultados do ensaio de resistência ao impacto, em função de níveis de CE e de CA nos compósitos	133
Figura 69 - Gráfico dos resultados do ensaio de dureza Shore D, em função de níveis de CE e de CA nos compósitos	135
Figura 70 - Temperatura de deflexão sob aquecimento, HDT (°C), de tratamentos produzidos na extrusora + injetora e na Drais + injetora	139
Figura 71 - Efeitos do processo produtivo e do tipo de reforço no desempenho mecânico, térmico e termomecânico dos compósitos.....	141

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Composição dos 10 tratamentos.....	65
Tabela 2 - Resultados dos estudos das partículas: densidade e umidade	79
Tabela 3 - Valores de índice de fluidez (MFI) obtidos e encontrados na literatura para o polipropileno biorientado (BOPP).....	80
Tabela 4 - Composição química completa das cascas de eucalipto e de arroz, em porcentagem.....	81
Tabela 5 - Composição química das cascas de eucalipto e de arroz utilizadas neste trabalho (livres de cinzas) e de materiais lignocelulósicos encontrados na literatura	82
Tabela 6 - Distribuição por tamanho das partículas de cascas de eucalipto (CE).....	83
Tabela 7 - Distribuição por tamanho das partículas de cascas de arroz (CA).....	89
Tabela 8 - Valores médios de densidade	113
Tabela 9 - Valores médios de resistência à tração.....	115
Tabela 10 - Valores médios de flexão: tensão na força máxima (MOR) e módulo de elasticidade (MOE).....	117
Tabela 11 - Valores médios de resistência ao impacto.....	120
Tabela 12 - Valores médios de dureza Shore D	122
Tabela 13 - Ensaio mecânico para avaliar o processamento e a inserção de fibra (CE e CA) em materiais compósitos produzidos com BOPP.....	124
Tabela 14 - Valores médios das propriedades mecânicas, em função do nível de presença de CE nos materiais compósitos.....	127
Tabela 15 - Valores médios dos ensaios mecânicos, em função do nível de presença de CA nos materiais compósitos.....	127
Tabela 16 - Valores médios de condutividade térmica.....	136
Tabela 17 - Condutividade térmica de diversos materiais.....	138
Tabela 18 - Melhores e piores tratamentos dos ensaios mecânicos, térmicos e termomecânicos	140
Tabela 19 - Avaliação dos efeitos do processo produtivo e do tipo de reforço no desempenho mecânico dos compósitos	142

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

A – Área
ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABTCP – Associação Brasileira Técnica de Celulose e Papel
AGRIANUAL – Anuário de Agricultura Brasileira
ASTM – American Society for Testing and Materials
BOPP – Polipropileno biorientado
C – Celulose
CA – Casca de arroz
CB – Casca de banana
Cc – Cinzas na celulose
CE – Casca de eucalipto
CETEA – Centro de Tecnologia de Embalagem
Ch – Cinzas na holocelulose
Cl – Cinzas na lignina
Clc – Celulose livre de cinzas
Cod. – Código
Cps – Corpos de provas
DTC – Determination of thermal conductivity
E – Extratos
EPM – Erro padrão médio
Equip. – Equipamentos
EUA – Estados Unidos da América
FC – Fibra de coco
FCA – Faculdade de Ciências Agrônomicas
FJ – Fibra de juta
FM – Fibra de malva
FV – Fibra de vidro
g/min – gramas por minuto
H – Holocelulose
HDT – Temperatura de deflexão sob aquecimento
Hlc – Holocelulose livre de cinzas
IBÁ – Indústria Brasileira de Árvores

IBB – Instituto de Biociências
IPT – Instituto de Pesquisas Tecnológicas
ISO – International Organization for Standardization
J/m – Joule por metro
L – Lignina
Llc – Lignina livre de cinzas
Ltda. – Limitada
M – Máquina
MDF – Medium Density Fiberboard
MDP – Medium Density Particleboard
MEV – Microscopia Eletrônica de Varredura
MFI – Melt Flow Index
mm – Milímetros
MOE – Módulo de elasticidade
MPa – Mega Pascal
NBR – Norma Brasileira
OSB – Oriented Strand Board
P – Probabilidade
PEAD – Polietileno de alta densidade
PEBD – Polietileno de baixa densidade
PP – Polipropileno
PS - Poliestireno
PVC – Policloreto de vinila
Q – Quantidade de calor
R – resíduo
R. poli – Resina poliéster
Res. epóxi – Resina epóxi
RPM – rotações por minuto
RSU's – Resíduos sólidos urbanos
SAS – Statistical Analysis System
SM – Sabugo de milho
TAPPI – Technical Association of the Pulp and Paper
UNESP – Universidade Estadual Paulista
UV – Ultravioleta

W/m.k – Watts por metro e por kelvin

WPC – Wood Plastic Composites

WWF – Wood Waste Flour

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	27
1.1 OBJETIVO GERAL.....	30
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	30
2 REVISÃO DE LITERATURA	31
2.1 RECICLAGEM DE RESÍDUOS SÓLIDOS	31
2.2 RESÍDUO URBANO	32
2.3 RESÍDUO INDUSTRIAL.....	32
2.3.1 Polipropileno biorientado (BOPP).....	33
2.3.2 Resíduo florestal - casca de eucalipto (CE).....	36
2.4 RESÍDUO AGROINDUSTRIAL.....	38
2.4.1 Casca de arroz (CA)	39
2.5 COMPÓSITOS.....	40
2.5.1 Matriz	45
2.5.1.1 Matriz polimérica em compósitos	45
2.5.2 Fase dispersa (carga/reforço).....	46
2.5.2.1 Fibras naturais em compósitos	47
2.5.3 Interface matriz/reforço	49
2.6 PRINCIPAIS PROCESSOS DE PREPARAÇÃO E MOLDAGEM	50
2.6.1 Processo por extrusão	51
2.6.2 Processo por misturador termocinético, tipo K-mixer (Drais/“Dryser”).....	52
2.6.3 Moldagem por injeção	53
3 MATERIAL E MÉTODOS.....	55
3.1 FLUXOGRAMA DAS ETAPAS DO TRABALHO	55
3.2 MATÉRIAS-PRIMAS	55
3.2.1 Resíduos industriais.....	56
3.2.1.1 Embalagens de café aluminizadas (BOPP)	56
3.2.1.2 Cascas de eucalipto (CE).....	56
3.2.2 Resíduo agroindustrial – casca de arroz (CA).....	57
3.3 PRODUÇÃO DAS PARTÍCULAS E SECAGEM.....	58
3.4 CARACTERIZAÇÃO FÍSICA, MFI E QUÍMICA DAS PARTÍCULAS DOS RESÍDUOS.....	61
3.4.1 Densidade aparente e umidade das partículas dos resíduos	61
3.4.2 Índice de fluidez – MFI (BOPP)	62

3.4.3	Caracterização química dos resíduos (CE e CA)	63
3.4.4	Distribuição em tamanho das partículas – granulometrias	63
3.5	PREPARAÇÃO DOS COMPÓSITOS	64
3.5.1	Mistura das matérias-primas	66
3.5.1.1	Processo utilizando o equipamento Drais	66
3.5.1.2	Processo utilizando o equipamento extrusora	66
3.6	MOLDAGEM DOS CORPOS DE PROVA	67
3.6.1	Injeção	67
3.6.2	Compressão a quente – prensagem	68
3.7	CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA, TÉRMICA E MORFOLÓGICA DOS COMPÓSITOS	69
3.7.1	Ensaio mecânicos	69
3.7.1.1	Resistência à tração	69
3.7.1.2	Resistência (MOR) e rigidez (MOE) à flexão	70
3.7.1.3	Resistência ao impacto	72
3.7.1.4	Dureza Shore D	73
3.7.2	Ensaio térmico	74
3.7.2.1	Condutividade térmica	74
3.7.3	Ensaio de morfologia	75
3.7.4	Ensaio termomecânico	76
3.7.4.1	Ensaio de Temperatura de deflexão sob aquecimento – HDT	76
3.8	DELINEAMENTO ESTATÍSTICO E ANÁLISES	78
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	79
4.1	CARACTERIZAÇÃO DAS PARTÍCULAS DOS RESÍDUOS	79
4.1.1	Caracterização física – densidade aparente e umidade das partículas	79
4.1.2	Índice de fluidez (MFI) do BOPP	79
4.1.3	Caracterização química dos resíduos – CE e CA	80
4.1.4	Caracterização granulométrica – distribuição por tamanho das partículas de CE e CA	83
4.2	ENSAIO DE MORFOLOGIA DAS PARTÍCULAS	96
4.2.1	Ensaio de morfologia – avaliação em função do tipo de reforço incorporado (CE ou CA)	99
4.2.2	Ensaio de morfologia – avaliação em função do processo produtivo utilizado	107
4.3	CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DOS COMPÓSITOS – DENSIDADE	113
4.4	CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA DOS COMPÓSITOS	114
4.4.1	Resistência à tração	114

4.4.2 Resistência (MOR) e rigidez (MOE) à flexão	117
4.4.3 Resistência ao impacto	120
4.4.4 Dureza Shore D	122
4.5 CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA – AVALIAÇÃO EM FUNÇÃO DO PROCESSO PRODUTIVO E DO TIPO DE REFORÇO	124
4.6 CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA – AVALIAÇÃO EM FUNÇÃO DO TEOR DE REFORÇO INCORPORADO	126
4.7 CARACTERIZAÇÃO TÉRMICA.....	136
4.7.1 Condutividade térmica.....	136
4.8 CARACTERIZAÇÃO TERMOMECÂNICA	139
4.8.1 Temperatura de deflexão sob aquecimento (HDT)	139
4.9 CONSIDERAÇÕES FINAIS	140
4.9.1 Caracterização mecânica, térmica e termomecânica dos materiais compósitos.....	140
4.9.2 Avaliação dos efeitos do processo produtivo e do tipo de reforço no desempenho mecânico, térmico e termomecânico dos compósitos	141
4.9.3 Avaliação dos efeitos do processo produtivo e do tipo de reforço no desempenho mecânico dos compósitos	141
4.9.4 Síntese dos resultados.....	142
5 CONCLUSÕES	144
6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	146
REFERÊNCIAS	147

1 INTRODUÇÃO

Desde o Renascimento, entre os séculos XIV e XVI, o homem tem adquirido muito conhecimento, principalmente nas áreas da Física, Química, Matemática e Biologia, o que impulsionou a criação de tecnologia aplicável à produção de bens de consumo e preservação da saúde. Todo esse avanço científico contribuiu para acelerar o crescimento da população humana em níveis nunca antes vistos.

O aumento da população significou aumento da demanda por bens de consumo, culminando na primeira Revolução Industrial, na Inglaterra e em alguns países da Europa continental, no século XVIII, e levando à segunda e maior Revolução Industrial, no fim do século XIX, na Europa e também nos Estados Unidos da América.

Do crescente ciclo “Revolução Industrial/aumento populacional” nota-se como consequência uma crescente agressão à natureza. Empolgada com o lançamento de novos produtos, a humanidade endereçou-se para o que se costuma chamar de “consumismo”. A descoberta do novo (progresso científico) e a produção da novidade (progresso tecnológico e industrial) incorporaram-se à educação humana, desde os níveis primários até o universitário. Foi somente a partir da segunda metade do século XIX que o homem começou a ter uma preocupação maior com a destruição da natureza, quando a degradação ambiental e suas catastróficas consequências foram percebidas em nível mundial.

Esse cenário desastroso relacionado à exploração do nosso planeta vem piorando a cada dia. Em todo o mundo, a extração de recursos naturais, renováveis ou não, na maioria das vezes feita de maneira predatória, culmina na destruição do meio ambiente e na extinção de espécies biológicas. Outro fator que deve ser levado em consideração é o fato de muitas cidades não terem condições de depositar seus resíduos em aterros adequados, fazendo com que fiquem expostos, aumentando assim a poluição do ar, da água e do solo pelos resíduos industriais, urbanos e agrícolas. Esses resíduos são depositados muitas vezes em lugares clandestinos, obstruindo córregos e áreas de drenagens, colaborando para a formação de enchentes e proliferação de mosquitos e outros vetores de doenças. Para minimizar esses impactos, é necessário empenhar elevada quantidade de recursos públicos.

Havendo a construção de aterros sanitários, há também a necessidade da implantação de coleta seletiva associada às cooperativas de reciclagem, de forma a prolongar a vida útil desses aterros e não desperdiçar materiais potencialmente recicláveis. Todavia, esses aterros ocupam espaços cada vez mais valorizados, especialmente aqueles próximos aos grandes centros urbanos. Por concentrarem resíduos, muitos deles nocivos, esses aterros representam

grande risco de acidentes ambientais, mesmo quando todas as medidas de segurança são empregadas. Resíduo reciclado é produtivo e não ocupa espaço em aterros. Além disso, resíduos nocivos podem ser “encapsulados” no processo de reciclagem dando origem a produtos que não oferecem risco à saúde, como, por exemplo, os conduítes corrugados termoplásticos, feitos a partir de embalagens de defensivos agrícolas.

Os resíduos de origem plástica estão cada vez mais presentes no nosso cotidiano. Para atender às exigências do mercado, novos produtos feitos de plásticos são lançados constantemente. Essa crescente produção indica a necessidade de estudos que viabilizem sua reciclagem. Nos aterros, os plásticos dificultam a compactação do lixo, criando camadas impermeáveis que afetam as trocas de líquidos e gases gerados, diminuindo a eficiência do processo de biodegradação da matéria orgânica.

Diante dessa realidade, a reciclagem tem muita importância. Assim, a ciência, em conjunto com a tecnologia, está ajudando a reciclar resíduos que há pouco tempo não poderiam ser reciclados ou mesmo cuja reciclagem não despertava interesse. Um exemplo são as embalagens de salgadinhos, bolachas e café, que possuem como componentes majoritários o plástico e o alumínio, material denominado polipropileno biorientado (BOPP).

Neste trabalho foram utilizadas embalagens de BOPP com o intuito de reaproveitar um resíduo muito pouco reaproveitado. Atualmente, o BOPP é reciclado, porém não em grande escala. Essas embalagens aluminizadas não têm um maior índice de reciclagem por falta de incentivo do governo, além da pouca informação dos recicladores e produtores acerca das possibilidades de reaproveitamento.

O resíduo agrícola utilizado no presente trabalho foi a casca de arroz, devido à sua produção em elevada quantidade e ao seu baixo reaproveitamento. Essa casca tem baixo valor comercial, pois o alto percentual de sílica (SiO_2) e as fibras contidas não possuem valor nutritivo e por isso não são usadas na alimentação humana ou animal.

Segundo a Agriannual (2015), o Brasil ocupa o nono lugar na produção de arroz (em casca), com 12.279 mil toneladas métricas. De acordo com as companhias produtoras, como a Cerealista Guacira Alimentos Ltda., as cascas de arroz são um transtorno para as empresas, causando problemas com o seu armazenamento (grande volume) e alto custo com o seu descarte nos aterros sanitários.

Foram esses os desafios que motivaram a utilização da casca de arroz neste trabalho. Isso porque essa matéria-prima é de grande valor para a confecção de diversos materiais, como os materiais compósitos, e também porque oferece bom isolamento térmico.

A casca de eucalipto também foi utilizada como material de reforço nos materiais compósitos, e suas propriedades térmicas também foram avaliadas.

De acordo com a Indústria Brasileira de Árvores (IBÁ) (2015), o Brasil mantém uma produção florestal de cerca de 7,74 milhões de hectares de áreas de florestas plantadas, sendo 72% do total representado pelo gênero *Eucalyptus*.

Segundo Foelkel (2010), o teor médio de casca, para árvores florestais de eucalipto entre 1 a 8 anos, varia de 12% a 13,5% do seu volume, nas idades em que se encontram. Estima-se que a produção anual no Brasil seja de aproximadamente 27 milhões de metros cúbicos de cascas de eucalipto.

As indústrias de celulose e papel e de painéis reconstituídos de madeira estão tentando resolver o destino a ser dado às cascas de eucalipto. Esse seria um dos maiores desafios para essas empresas.

Do ponto de vista industrial, as cascas são tidas como resíduos do processo produtivo. As indústrias de papel e painéis reconstituídos de madeira obtêm esse resíduo na etapa de descascamento das toras.

Painéis do tipo MDF e MDP e produtos das indústrias de papel e celulose utilizam uma pequena porcentagem de casca de eucalipto. Para as fábricas de painéis, por exemplo, a quantidade elevada de cascas danifica a qualidade da superfície das chapas, causando-lhes irregularidades. Nas indústrias de papéis, as cascas são conhecidas como sujidades; elas formam o chamado *pitch*, que são manchas no papel.

Diante desse contexto, fica clara a razão da crescente preocupação em melhorar a questão do descarte dos resíduos, não apenas por instituições públicas e organizações não governamentais, como também por empresas privadas. O setor privado emerge como um importante construtor no cenário de preservação ambiental, especialmente com relação ao uso de tecnologia e investimentos, incorporando a preocupação ambiental na tomada de decisões. Nesse aspecto, as ações do governo são fundamentais para induzir mudanças na criação de uma nova cultura no setor privado.

Dessa forma, instituições e organizações vêm se mobilizando constantemente, criando normas e regulamentos e incentivando tecnologias para descarte e aproveitamento de resíduos.

Cada um dos milhões de produtos usados para “melhorar” a qualidade de vida das pessoas gera algum impacto ambiental, sendo que alguns causam baixo impacto enquanto outros podem consumir recursos finitos em grande quantidade. Através do desenvolvimento sustentável, é possível direcionar ações para a criação de novos produtos, partindo-se do

princípio do reaproveitamento de matérias-primas renováveis, visando à preservação do meio ambiente e à minimização de custos.

Atualmente, questões referentes ao desenvolvimento sustentável e à preservação do ecossistema apresentam-se em evidência, justamente por estarem diretamente ligadas à sustentabilidade da vida humana. Dessa forma, o desenvolvimento de um produto tem um papel importante, levando-se em consideração e procurando reduzir os impactos ambientais durante todo o seu ciclo de vida.

1.1 OBJETIVO GERAL

O objetivo do presente trabalho foi avaliar a viabilidade técnica de utilização de dois tipos de processos, a extrusora dupla rosca e o misturador termocinético Drais, na produção de compósitos de polipropileno biorientado (BOPP) aluminizado reforçados com resíduos de dois tipos de casca, de eucalipto e de arroz.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Analisar as propriedades dos compósitos confeccionados pelos dois processos, o da extrusora dupla rosca e o do misturador termocinético Drais, e dos corpos de provas moldados por injeção;

Estudar a influência do uso da extrusora e da Drais na confecção dos compósitos;

Analisar a influência do uso de diferentes tipos de resíduos de cascas e do BOPP nas propriedades mecânicas dos compósitos e nos dois processos utilizados (extrusora e Drais);

Comparar as propriedades mecânicas dos compósitos confeccionados pelos diferentes processos utilizados;

Entender o comportamento entre os tratamentos, a partir da avaliação por microscópio estéreo, com aumento de 50 vezes;

Analisar as temperaturas de deflexão térmica (HDT) dos tratamentos e compará-las à temperatura que um forro de PVC suporta;

Analisar a condutividade térmica dos tratamentos a fim de alcançar bom isolamento térmico.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 RECICLAGEM DE RESÍDUOS SÓLIDOS

A ABNT-NBR 10004 (NBR, 2004) define resíduos sólidos como:

Resíduos sólidos são aqueles nos estados sólido e semi-sólido, que resultam de atividades de origem industrial, doméstica, hospitalar, comercial, agrícola, de serviços e de varrição. Ficam incluídos nesta definição os lodos provenientes de sistemas de tratamento de água, aqueles gerados em equipamentos e instalações de controle de poluição, bem como determinados líquidos cujas particularidades tornem inviável o seu lançamento na rede pública de esgotos ou corpos de água, ou exijam para isso soluções técnicas e economicamente inviáveis em face à melhor tecnologia disponível.

Leão (1997) definiu resíduo como algo que fez parte de um processo produtivo ou não, e que eventualmente não está sendo aproveitado, mas que apresenta ainda uma utilização. Popularmente, o termo resíduo pode ser definido como lixo, sujeira, resto, algo sem valor, algo do qual se deve manter distância. De acordo com Lino (2011), lixo, sob o ponto de vista econômico, como todo material que uma dada sociedade ou agrupamento humano desperdiça. Isso pode decorrer de várias razões, como, por exemplo, problemas ligados à disponibilidade de informação ou de meios para realizar o aproveitamento do produto descartado, inclusive da falta do desenvolvimento de um mercado para produtos recicláveis. Embora muitas pesquisas já tenham sido feitas e pesquisadores estejam trabalhando para proporcionar o manejo adequado dos resíduos, seja por reciclagem, reutilização, compostagem, combustão ou disposição em aterros, muito há por fazer nessa área.

São conhecidos os problemas que os resíduos sólidos produzem, tais como: poluição ambiental no solo, ar, rios e mares, devido aos seus contaminantes; escassez de energia e seus custos crescentes; escassez e esgotamento das matérias-primas; transmissão de doenças decorrente da disposição final inadequada; raridade e custos dos aterros sanitários e incineradores, além dos incômodos causados à população.

A caracterização dos resíduos sólidos permite que estes não sejam apenas materiais acumulados sem utilidade, mas também matéria-prima para diferentes setores. Com a utilização desta fonte alternativa de matéria-prima, vários dos fatores negativos podem ser amenizados, principalmente o volume a ser aterrado (RIBEIRO, 1998).

A produção de materiais alternativos, a partir dos resíduos, se apresenta como uma alternativa viável, reduzindo custos para disposição dos resíduos sólidos e ainda gerando materiais que podem ser usados em casas populares (forros, divisórias, paredes, etc.).

Resíduos são substâncias, produtos ou materiais que, num processo industrial ou agrícola, são gerados, mas que no mesmo, ou em outro processo, ainda podem ser reaproveitados. Rejeitos consistem na parte inaproveitável dos resíduos, restando apenas a sua disposição final. Nesta disposição final têm que ser considerada sua inativação, neutralização, descontaminação ou desintoxicação (LEÃO, 1997).

2.2 RESÍDUO URBANO

Os Resíduos Sólidos Urbanos (RSU's), definidos pela ABNT (NBR, 2004) e vulgarmente denominados lixo urbano, são resultantes da atividade doméstica e comercial das povoações. A sua composição varia entre as populações, dependendo da situação socioeconômica e das condições e hábitos de vida de cada um. Esses resíduos podem ser classificados das seguintes maneiras:

- Matéria orgânica: restos de comida, da sua preparação e limpeza;
- Papel e papelão: jornais, revistas, caixas e embalagens;
- Plásticos: garrafas, garrafões, frascos, embalagens, boiões;
- Vidro: garrafas, frascos, copos;
- Metais: latas;
- Outros: roupas, óleos de cozinha e óleos de motor, resíduos informáticos etc.

Estima-se que cada pessoa produza, em média, 1,3 kg de resíduo sólido por dia. Dessa forma, uma pequena cidade de apenas 10 mil habitantes produziria cerca de 10 toneladas de lixo diariamente (GOVERNO FEDERAL, 2012).

2.3 RESÍDUO INDUSTRIAL

Resíduos industriais são aqueles provenientes de processos industriais. Possuem composição bastante diversificada e uma grande quantidade é considerada perigosa por serem tóxicos, e causando poluição do ar, da água e do solo. Podem ser constituídos por escórias

(impurezas resultantes da fundição de metais), cinzas, lodos, óleos, plásticos, papel, borrachas, entre outros.

2.3.1 Polipropileno biorientado (BOPP)

O BOPP foi introduzido na década de 1950, tornando-se uma das mais importantes resinas termoplásticas nos dias de hoje, e ainda continuando como a resina de maior crescimento, em especial na região da Ásia Central e Oriental, o que inclui a Coreia do Sul, Japão e China (CARVALHO, 2008).

O polipropileno tem um processo de fabricação muito parecido com o do polietileno de alta densidade, pelo fato de suas características químicas serem muito similares. É utilizado em filmes e películas para embalagens de diferentes utilizações, porém a sua maior aplicação é na indústria alimentar. Quando é empregado na embalagem final do produto, o polipropileno pode ser combinado com diversos plásticos, ou com lâminas de alumínio para aumentar a sua resistência mecânica e a permeabilidade a gases (CARVALHO, 2008).

Suas principais vantagens são: baixo custo, elevada resistência química a solventes, fácil moldagem, fácil coloração, alta resistência à fratura por estabilidade térmica, maior sensibilidade à luz UV e a agentes de oxidação, sofrendo degradação com maior facilidade (CARVALHO, 2008).

Existem duas tecnologias mais utilizadas na produção de filmes de BOPP. O processo plano em duas fases é o mais utilizado a nível industrial. O processo de estiramento plano em duas fases é feito em duas etapas, e é o mais importante a nível industrial, além de ser o responsável por cerca de 90% da produção de polipropileno biorientado (CARVALHO, 2008).

Existem diversos trabalhos com o uso do polipropileno. No trabalho de Macedo et al. (2015), o objetivo foi determinar o processo apropriado a produção de painéis OSB. Foram produzidos nove deles, com sua matriz constituinte composta de 70% de *Pinus sp.* E 30% das partículas de polipropileno biorientado (BOPP), cada três dos painéis produzidos por um método diferente. Os métodos utilizando BOPP foram mais eficientes.

Segundo Miguel et al. (2003), os filmes de BOPP são películas plásticas obtidas do processo de extrusão e estiramento da resina granulada de polipropileno. O BOPP é obtido a partir da transformação da resina granulada de polipropileno através das seguintes etapas:

- 1) Extrusão: para fusão do polipropileno;
- 2) Formação: onde ocorre a formação e resfriamento do filme de polipropileno;
- 3) Estiramento longitudinal e transversal: promovidos através de estiramento mecânico, resultando na película de polipropileno orientado biaxialmente;
- 4) Tração e tratamento da película orientada;
- 5) Embobinamento.

Desde 2000, a demanda pelo filme de polipropileno aumentou em torno de 8,7% ao ano, representando cerca de 5 milhões de toneladas em 2007. Devido ao contínuo crescimento do consumo deste polímero, a procura mundial de filme BOPP em 2012 foi de aproximadamente 7,8 milhões de toneladas.

O polipropileno extrudado é utilizado em filmes e películas para embalagens de diferentes usos, tendo a sua principal empregabilidade na indústria alimentícia. Quando utilizado na embalagem final do produto, o polipropileno pode ser associado a outros plásticos ou lâminas de alumínio, para aumentar a sua resistência mecânica e permeabilidade a gases (CARVALHO, 2008).

De acordo com Carvalho (2008), as principais vantagens que tornam o BOPP um material em expansão para produção de embalagens flexíveis são o baixo custo, a elevada resistência química a solventes, a fácil coloração, a elevada resistência à fratura por flexão ou fadiga, a boa resistência ao impacto acima de 15 °C, a estabilidade térmica, a maior sensibilidade à luz UV e agentes de oxidação, sofrendo degradação.

De acordo com uma reportagem do site Brasil Econômico (2010), as embalagens de BOPP, que até alguns anos atrás eram deixadas de lado por conterem uma fina camada de alumínio, foram avaliadas como próprias para reciclagem pelo Centro de Tecnologia de Embalagem (CETEA). A reciclagem do BOPP está ajudando a resolver um problema da Pepsi Co, fabricante dos salgadinhos Elma Chips (ensacados com embalagens de BOPP aluminizados). Em 2010 a empresa colocou no mercado 20 mil displays (Figura 1) para exposição de seus produtos, feitos com embalagens de BOPP reciclados. Esse número equivale a 20% do volume anual de displays adquiridos pela companhia. São utilizados cerca de 675 embalagens de salgadinhos (embalagens de BOPP aluminizadas) para produzir cada display.

Segundo o site Sou Ecológico (2014), até novembro de 2014, mais de 144 mil displays foram produzidos com BOPP 100% reciclado.

Além de menor custo, as prateleiras levam menos tempo para serem fabricadas, o que se traduz em ganho de energia.

FIGURA 1 - DISPLAYS FABRICADOS COM EMBALAGENS DE SALGADINHOS (BOPP)



FONTE: Brasil Econômico (2010) e Sou Ecológico (2014).

Até alguns anos atrás as embalagens de salgadinhos compostas por BOPP não eram recicladas, por falta de um processo industrial e também pelo seu baixo peso, fato que desestimulava as cooperativas a coletarem e separarem esse tipo de material.

A WISEWASTE (2015) desenvolveu um processo de reciclagem do BOPP e um programa de estímulo às cooperativas para a coleta do material. Foram recicladas 136 toneladas de embalagens de salgadinhos, o equivalente a 45 milhões de embalagens que foram transformadas em 8 mil pallets de plástico (Figura 2), destinados aos fabricantes dos salgadinhos, fechando assim o ciclo produtivo do BOPP na empresa.

FIGURA 2 - PALLETS FABRICADOS COM EMBALAGENS DE SALGADINHOS (BOPP)



FONTE: Wisewaste (2015).

Segundo o site Embalagem Sustentável (2012) no relatório “Simbologia de reciclagem para laminados de BOPP”, produzido pelo CETEA (Centro de Tecnologia de Embalagem), encomendado pela Vitopel, fabricante de BOPP, dentre 19 empresas, oito não reciclam o BOPP. Funcionários das demais empresas afirmaram ainda que sequer conheciam o material BOPP e somente duas empresas consultadas reciclavam apenas o BOPP aluminizado pré-consumo. Essas empresas não trabalham com BOPP pós-consumo devido aos problemas de lavagem e separação do material coletado. Em alguns casos, a presença da tinta de impressão dificulta a reciclagem, enquanto que a metalização não apresenta esse problema.

Segundo o CETEA, uma vez que a espessura da camada de alumínio (30 nm) presente nas embalagens de BOPP aluminizadas é cerca de 1.000 vezes menor do que a espessura do filme de BOPP (20 μm), e não foi identificado nenhum problema tecnológico para a reciclagem deste material., é um material tecnicamente reciclável, porém apenas o de origem industrial e por poucas empresas. Entretanto, o BOPP de origem industrial é reciclável, porém poucas empresas oferecem esse tipo de serviço (EMBALAGEM SUSTENTÁVEL, 2012).

De acordo com a empresa WISEWASTE (2015), os filmes aluminizados não são reciclados com mais frequência devido à falta de informação. Além disso, as cooperativas de reciclagem não coletam as embalagens por desconhecerem a sua possibilidade de reaproveitamento, culminando seu descarte junto com o lixo comum nos aterros sanitários.

2.3.2 Resíduo florestal - casca de eucalipto (CE)

De acordo com Foelkel (2010), o eucalipto constitui um gênero de plantas muito amplo, abrangendo desde arbustos até árvores gigantescas (uma árvore de *Eucalyptus regnans* com mais de 140 metros de altura é considerada a mais alta árvore presente na natureza até a atualidade). Devido à sua elevada capacidade de adaptação, o eucalipto é comumente encontrado no território nacional, tanto no meio urbano quanto no rural.

A casca é a cobertura exterior de toda a árvore, desde as raízes até o tronco e os ramos. Ela possui tecidos específicos para transportar a seiva orgânica elaborada pelas folhas, para armazenar substâncias energéticas e nutrientes minerais, e para dar suporte e prover resistência à matriz que ela ajuda a compor. Os eucaliptos são conhecidos pela diversidade e beleza de suas cascas (Figura 3). Elas possuem diferentes modelos, texturas, desenhos e cores. É possível identificar algumas espécies de eucalipto pelo tipo da sua casca (FOELKEL, 2010).

FIGURA 3 - TRONCOS DE EUCALIPTOS (CASCAS)



FONTE: Foelkel (2010).

A quantidade de casca nas árvores varia com a espécie, idade cronológica e fisiológica, bem como o tamanho das árvores e a estação do ano. A determinação da quantidade de casca nas árvores não é simples, porque não há formação uniforme sobre o tronco. Portanto, existem irregularidades em sua espessura e o desprendimento do ritidoma colabora ainda mais para agravar essa desuniformidade (FOELKEL, 2010). De acordo com Alzate (2004), o teor de casca constitui em aproximadamente 10 a 20% do volume total do tronco da árvore.

Segundo Foelkel (2010), árvores jovens de eucaliptos comerciais, plantados no Brasil, possuem cerca de 15% a 20% de casca base volume. Árvores com 6 a 8 anos de idade de áreas com elevada produtividade, compostas de clones oriundos de programas de melhoramento genético, possuem entre 9% a 13% de casca em seu volume colhido. Sendo assim, pode-se admitir que o teor de casca médio para árvores florestais de eucalipto entre 1 a 8 anos esteja entre 12% a 13,5% dos seus volumes, nas idades em que se encontram. Isso

então nos permite estimar uma produção anual entre 24 a 27 milhões de metros cúbicos de cascas de eucaliptos.

A casca das árvores e das toras dos eucaliptos plantados é uma das grandes fontes de biomassa vegetal e fotossintética disponíveis para a sociedade brasileira. Em 2009 a área de florestas plantadas de eucalipto no Brasil correspondia a 4,5 milhões de hectares. Essa biomassa definitivamente não pode ser deixada sem que haja uma avaliação do seu potencial como produto florestal (FOELKEL, 2010).

Infelizmente, grande parte das cascas geradas pelo descascamento de toras nas indústrias acaba sendo descartadas e acumuladas, formando grandes montes de resíduos, ocupando espaço e aumentando o risco de incêndios. Segundo Carneiro et al. (2009), as cascas de *Eucalyptus sp.* são, assim, um subproduto que vem trazendo grandes problemas de descarte e de ordens ambiental e econômica, uma vez que milhares de toneladas de casca são produzidas anualmente pelas indústrias que consomem madeira de eucalipto.

Hoje as cascas de eucaliptos estão sendo usadas como cobertura morta (*mulching*) em jardins, para reabilitação de áreas degradadas, proteção de encostas e taludes de estradas, compostagem, adubos, briquetes ou toretes de biomassa densificada, produção de carvão vegetal e fornecimento de fitoquímicos, na forma de óleos essenciais, taninos, compostos fenólicos. Uma significativa parcela dela já vem sendo consumida como biomassa energética, alimentando caldeiras de força em fábricas de celulose e papel, painéis de madeira, etc. (FOELKEL, 2010).

Na floresta ela age como inibidora de predadores, pois é muito mais rica em elementos minerais do que a madeira, tornando-se menos apetitosa para os roedores e para os herbívoros. As cascas das árvores cumprem também um magnífico papel ambiental, sendo deixada para decomposição sobre o solo das áreas florestais após a colheita das árvores, quando o descascamento é feito no campo florestal, servindo como serapilheira, contribuindo para uma maior formação de matéria orgânica no solo (FOELKEL, 2016).

2.4 RESÍDUO AGROINDUSTRIAL

Resíduos agroindustriais são provenientes de processos produtivos da atividade agrícola, como, por exemplo, o bagaço da cana-de-açúcar, a casca de arroz, o sabugo de milho, o bagaço de limão e laranja, a casca de amendoim, a palha de trigo, entre outros.

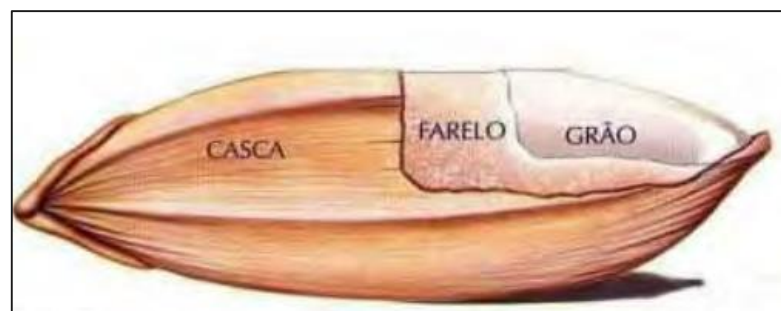
2.4.1 Casca de arroz (CA)

Segundo Houston (1972) a casca de arroz (Figura 4) é um subproduto do beneficiamento do grão de arroz e corresponde, em média, de 20% a 25% do peso do grão. A casca de arroz possui em torno de 32% de celulose, 28% de lignina, 20% de hemicelulose e 20% de matéria inorgânica, cuja fração inorgânica contém entre 95% a 98% de sílica, óxidos de potássio, magnésio, sódio e cálcio. O restante são traços de elementos como ferro, manganês e alumínio (HOUSTON, 1972; SOUZA; YAMAMOTO, 1999). No percentual de matéria inorgânica da casca de arroz, 96% são compostos por sílica.

Os maiores produtores mundiais de arroz são a China, seguida da Índia, Indonésia, Bangladesh e Vietnã. O Brasil ocupa o nono lugar, contribuindo com 1,7% da produção mundial. (AGRIANUAL, 2015). Anualmente, o estado do Rio Grande do Sul contribui com aproximadamente 40% do total de arroz produzido no território nacional, resultando em torno de um milhão de toneladas de casca de arroz.

As empresas beneficiadoras são as principais consumidoras da casca, utilizando-a como combustível para a secagem e parboilização dos grãos. Contudo, empresas de pequeno porte não descartam adequadamente as cinzas produzidas nesse processo (MELO, 2009).

FIGURA 4 - CONSTITUIÇÃO DO GRÃO DE ARROZ



FONTE: Esbento, 2000.

De acordo com Della, Kühn e Hotza (2001), a casca de arroz apresenta elevada dureza, fibrosidade, natureza abrasiva e boa resistência ao desgaste. Esse material pode ser usado na fabricação de blocos e painéis empregados na construção civil. A queima fornece o calor necessário para a parboilização dos grãos. Contudo, após esse processo, há formação de cinzas, que apresentam características pozolânicas, devido ao elevado teor de óxido de silício. Esse material inorgânico pode ser utilizado na produção de vidros, isolantes térmicos,

agregados em argamassas e concretos, tijolos prensados, cimento Portland e refratários, além de outros materiais alternativos de construção (ZUCCO e BERALDO, 2008).

Chen (1980) destaca que, economicamente, a utilização da casca de arroz na confecção de painéis aglomerados pode ser viável, pois os custos para seu transporte são competitivos com os custos para o transporte de partículas de madeira. A aquisição, no entanto, da casca de arroz pode sair mais barata, por se tratar de um resíduo agrícola que, na maioria das vezes, não é aproveitado. Já a madeira utilizada na produção de partículas pode ser reaproveitada para manufatura de produtos de maior valor agregado. Devido ao elevado teor de sílica e à dificuldade de decomposição, a casca de arroz é um problema ambiental e de saúde, sobretudo nas regiões onde o cultivo do arroz se faz em larga escala.

No momento da incorporação da casca de arroz, na forma de matéria-prima alternativa, à manufatura de painéis, certamente haverá valorização deste resíduo. A tecnologia da fabricação de painéis, utilizando a casca de arroz, vem ganhando um importante enfoque, especialmente nos países asiáticos, que são os principais produtores de arroz.

Youngquist et al. (1994), estudaram a possibilidade de produção de compósito, a ser utilizado em construção civil, incorporando casca de arroz ao poliéster. O resultado foi um material leve, durável e isolante térmico.

Na confecção de compósitos contendo biomassa vegetal e cimento Portland, a casca de arroz contribuiu com leveza e características de isolamento termoacústico do compósito; ao cimento Portland cabe a tarefa de envelopar a biomassa vegetal (BERALDO, 1997). Parte da casca de arroz também foi utilizada na fabricação de blocos e painéis empregados na construção civil, substituindo fibra de madeira (FONSECA, 1999).

A casca de arroz também foi empregada na fabricação de tijolos e telhas fabricados com argila, exibindo bom isolamento de calor e concreto de baixo peso (GOIVINDARAO, 1980).

2.5 COMPÓSITOS

Segundo Leão (2011), os compósitos englobam quase todos os domínios de material (móvel de casa, embalagem, automóvel, aeroespacial, desporto, lazer entre outros). Todos os polímeros sintéticos (plásticos, termofixos e elastômeros) podem ser utilizados como matrizes e reforços. Além do pó inorgânico, têm sido utilizadas frequentemente fibras inorgânicas sintéticas, como o vidro, carboneto de silício, ou fibras orgânicas, como o carbono e aramida, na forma de fibras individuais (picadas ou contínuas).

Segundo Callister e William (2008), o desenvolvimento de materiais compósitos e a combinação dos diversos tipos de materiais possibilitam a ampliação de suas propriedades. Embora não haja uma definição universalmente aceita, de maneira geral, pode-se considerar um compósito como sendo um material multifásico que exiba uma proporção significativa das propriedades de ambas as fases que o constituem, de tal modo que é obtida uma melhor combinação de propriedades, sendo que as fases constituintes devem estar separadas por uma interface distinta e de escala microscópica. Geralmente são compostos por apenas duas fases; uma é chamada de matriz, que é contínua e envolve a outra fase, chamada de fase dispersa. De acordo com o princípio da ação combinada, propriedades podem ser obtidas pela combinação judiciosa de dois ou mais materiais distintos entre si, com a finalidade de alcançar-se uma melhor combinação de propriedades.

De acordo com a ASTM (2001), compósito é uma mistura física, de dois ou mais materiais combinados para formar um novo material útil de engenharia, com propriedades diferentes dos componentes puros, podendo ser obtidos por combinação de metais, cerâmicas ou polímeros. TITA (1999) fez uma extensa descrição dos materiais compósitos, observando que são constituídos de um ou mais materiais dispersos numa matriz, chamados de reforço ou carga. Os materiais de reforço podem ser fibras curtas, longas, contínuas, descontínuas, e outras com objetivo de fornecer resistência. A matriz envolve o reforço, dando forma ao compósito. Abaixo de um comprimento mínimo, as fibras deixam de atuar como reforço e fazem o papel de enchimento ou carga.

O importante em um compósito é o efeito sinérgico que se observa no sistema, em que as suas propriedades finais são uma mistura melhorada das propriedades de seus componentes individualmente (CALLISTER e WILLIAM, 2008).

Uma das mais importantes características dos compósitos é a capacidade de terem suas propriedades modificadas através da alteração de uma das diversas variáveis de projeto e processamento. Algumas dessas variáveis são: o tipo do constituinte, concentração, tamanho e forma, distribuição, orientação dos constituintes, entre outras (OREFICE et al., 2012).

A estrutura da interface fibra-matriz desempenha um papel importante nas propriedades mecânicas e físicas dos materiais compósitos, porque é através desta interface que ocorre a transferência de carga, da matriz para a fibra. A matriz tem o papel de manter a integridade estrutural do compósito através da ligação simultânea com a fase dispersa, em virtude de suas características coesivas e adesivas. Sua função é de transferir a carga aplicada à fase dispersa uma boa dispersão das fibras na matriz polimérica é necessária para buscar a melhor condição de homogeneidade (RAZERA e FROLLINI, 2004).

A criação desses compósitos tornou-se necessária, pois muitas tecnologias modernas exigem materiais com propriedades incomuns, ausentes em materiais convencionais, como ligas metálicas ou cerâmicas (CALLISTER e WILLIAM, 2008).

O tijolo de adobe é um dos mais antigos compósitos que se conhecem, no qual aparece uma palha, como material fibroso, misturada com argila ou lama (adesivo com elevada resistência à compressão). A palha facilita a retirada da água da argila e permite que as trincas de contração, nessa secagem, distribuam-se uniformemente, o que aumenta significativamente a resistência desse material (CORREA, 2004).

O bambu é comumente citado como um compósito estrutural de madeira, combinando a grande resistência da fibra celulósica com a tenacidade e a dureza da matriz de lignina. O concreto armado também é um exemplo clássico de compósito no qual a vantagem da elevadíssima resistência à tração do aço é combinada com resistência à compressão do concreto (um compósito de brita e cimento), superando as desvantagens de cada constituinte isoladamente. O resultado é um material com propriedades únicas para aplicações estruturais na construção de edifícios, pontes e pavimentos (CORREA, 2004).

O uso de compósitos surgiu na área de produção aeronáutica, devido à necessidade de diminuição do peso dos materiais, mas com a necessária preservação da robustez e resistência dos componentes estruturais. Atualmente, substituindo o metal, aparecem variados materiais compósitos, no fabrico de portas internas, portas de trens de aterrissagem e fusilagem (PEREIRA, 2005).

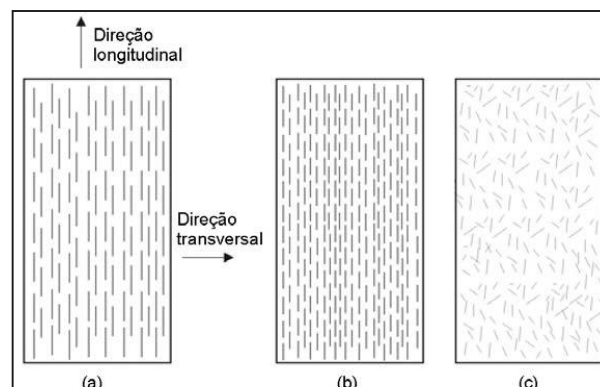
A finalidade dos compósitos é a formação de novos produtos, com o melhor aproveitamento possível das propriedades individuais de cada um dos componentes, de modo sinérgico. Nas indústrias de autopeças, por exemplo, há a fabricação de grande variedade de produtos, como protetores de cárter, painéis e bancos, aliando leveza a bom desempenho, com baixo custo e maior facilidade de reciclagem no fim do ciclo de duração desses componentes (LIMA e MAGALHÃES, 2008).

Um compósito é formado sinérgicamente, apresentando propriedades melhoradas, em relação às propriedades de seus componentes individuais. Leão (1997) apresenta-nos o caso das fibras naturais, que têm um dos maiores *modulus* resistência/peso, o que faz delas um importante componente para a formação de compósitos, com a celulose atuando como reforço e a lignina como matriz.

As propriedades dos compósitos dependem muito do tipo da fibra, da matriz e das diferentes combinações entre fibra/matriz, além do processo de fabricação (SCHUH e GAYER, 1996). A distribuição das fibras, bem como sua concentração e orientação, também

têm importante influência na resistência e em outras propriedades dos compósitos reforçados com fibras. Há duas possibilidades de orientação: o alinhamento aleatório ou o alinhamento paralelo ao eixo longitudinal das fibras. Comumente, as fibras longas, contínuas, estão alinhadas paralelamente, e as curtas, descontínuas, podem estar alinhadas ou orientadas aleatoriamente (Figura 5). Quando a distribuição das fibras é uniforme, ocorre melhor combinação das propriedades dos compósitos (CALLISTER e WILLIAM, 2008).

FIGURA 5 - REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DE COMPÓSITOS REFORÇADOS COM FIBRAS: (A) CONTÍNUAS E ALINHADAS; (B) DESCONTÍNUAS E ALINHADAS; (C) DESCONTÍNUAS ALEATÓRIAS



FONTE: Callister e William (2008).

A escolha entre um tipo de fibra e uma matriz depende principalmente da aplicação que dará ao compósito: resistência a corrosão, características mecânicas elevadas, resistência a alta temperatura, ou outras características fundamentais, mas muitas vezes o custo econômico pode ser um fator de realce nessa escolha. Deve ser observada a compatibilidade entre as fibras e as matrizes (PEREIRA, 2005).

Franco e Vega (1997) realçam que o baixo peso dos compósitos, além de suas propriedades mecânicas e resistência a condições adversas, deve ser considerado como uma de suas principais vantagens. Bem por isso, os compósitos têm vasta aplicação, seja ou não como componentes estruturais, e suas propriedades finais dependem basicamente da orientação e configuração das fibras. No caso dos compósitos de fibras curtas, essas propriedades são de mais difícil previsão, pois há problemas quanto à distribuição e orientação desigual dessas fibras, dentro da matriz, de difícil controle pelos métodos de processamento utilizados nas indústrias, como compressão, extrusão ou injeção moldada com materiais termoplásticos. Outro principal requisito na produção de compósitos resistentes é o grau de adesão entre as fibras e a matriz.

Sendo muito mais leves que os materiais metálicos, os compósitos propiciam economia de combustível, com aumento acentuado de carga útil, seja aeroespacial ou automotiva. A redução na massa total do produto pode ser de 30% ou mais, dependendo de sua aplicação (PEREIRA, 2005).

Inicialmente, na indústria automobilística, eram produzidos somente para-choques e tetos de automóveis de materiais compósitos. Atualmente, o material compósito é utilizado para a fabricação de capôs, cárter de óleo, colunas de direção, árvores de transmissão, molas laminadas, painéis etc. (PEREIRA, 2005).

Outro ponto importante relacionado aos materiais compósitos é o consumo de energia para sua produção, que é muito menor quando comparado a materiais cerâmicos, como o tijolo, e metálicos, como o aço e o alumínio (LIMA e MAGALHÃES, 2008).

Mano (2000) classifica os compósitos em matriciais e estruturais, comparando um sistema compósito ao corpo humano, onde há componentes matriciais, como gorduras e proteínas, e componentes estruturais, como músculos, dentes e ossos. O componente matricial normalmente é um polímero orgânico, podendo ser duro ou macio, termofixo ou termoplástico, e a função da matriz é manter o espaçamento e a orientação das fibras, transmitindo as forças de cisalhamento entre suas camadas, assegurando a resistência a torções e dobras, e também protegendo as fibras de prejuízos superficiais.

A utilização de termoplásticos com reforços de fibras naturais já vem da década de 1970, nos produtos fabricados com polipropileno, sendo este reforçado com lignocelulósicos.

Esse compósito foi usado no interior de automóveis, nas placas então conhecidas como Woodstock. Esses compósitos são extrudados e laminados em chapas, usados para revestimento interno de porta-malas e portas de veículos (CORREA et al., 2003; RODOLFO Jr. e JOHN, 2006).

Essa adição de fibras de reforço em matrizes termoplásticas aumenta consideravelmente a resistência mecânica do polímero termoplástico. Quanto à micromecânica dos compósitos, aplica-se o que convencionou-se chamar de Regra de Mistura, que considera as propriedades do compósito como proporcionais à fração volumétrica e às propriedades dos componentes (CALLISTER e WILLIAM, 2008).

Os compósitos obtidos com reforços lignocelulósicos e polímeros apresentam vantagens em relação ao plástico puro, pois suas fibras reforçam o material, dando-lhe maior resistência a forças externas, evitando sua deformação e perda de função, além de poder ser usado como substituto de outros materiais (CANTO, 1995). Esses compósitos à base de reforços lignocelulósicos e polímeros têm substituído a madeira *in natura*. Em 2002, nos

EUA, foram utilizadas aproximadamente 400 mil toneladas de polímeros com reforço lignocelulósico (JIANG e KAMDEM, 2004).

Correa et al. (2003) comenta que a maior parte do mercado de compósitos termoplásticos com reforços lignocelulósicos está na construção civil, principalmente com materiais em polipropilenos, polietilenos e PVC extrudados com resíduo de madeira, em batentes de portas e janelas, revestimentos, perfis para assoalhos etc. Jiang e Kandem (2004) e Jiang et al. (2003) mostram que nos EUA houve um crescimento anual de aproximadamente 60% no mercado para termoplásticos, com aplicação em materiais para construção. Isso pode ser observado pelo aumento no número de patentes depositadas no país, relacionadas a essa atividade econômica, e também pela maior demanda dessas matérias-primas utilizadas como carga em termoplásticos.

Chamma (2004), chamou a atenção para a produção de compósitos utilizáveis na construção civil. Como exemplo, temos a mistura de poliéster com casca de arroz, que resulta em material leve, durável e bom isolante térmico.

2.5.1 Matriz

A matriz é a fase contínua do compósito que acomoda a fase dispersa em seu interior e é responsável pela transmissão das cargas aplicadas ao compósito para o reforço, além de protegê-la de degradações e desgastes provenientes de contatos com o ambiente (RODRIGUES, 2011). Os polímeros são muito utilizados como matriz em compósitos, pela facilidade e variedade de formas de processamento e as temperaturas de processo, relativamente baixas, que possibilitam sua utilização junto a cargas e reforços lignocelulósicos cuja estabilidade térmica não resiste a exposições em temperaturas muito elevadas (CALLISTER e WILLIAM, 2008). Além de materiais poliméricos, também são utilizados metais e cerâmicas como matrizes para formação de inúmeros tipos de compósitos (MEDEIROS, 2002).

2.5.1.1 Matriz polimérica em compósitos

Há matrizes resinosas, como a epóxi e o poliéster; minerais, como o carbono; metálicas, como as ligas de alumínio; cerâmicas e, finalmente, poliméricas. Geralmente os polímeros têm asticidade e resistência; as cerâmicas são rígidas e quebradiças; os metais

apresentam resistência e *modulus* resistência/peso intermediários, mas com boa ductibilidade (AMICO, 2006).

Segundo Ishizaki et al. (2006), a matriz polimérica é a grande responsável pela distribuição das tensões aplicada em compósitos poliméricos com fibras vegetais, devido às propriedades particulares das fibras lignocelulósicas. A interação entre a fibra e a matriz polimérica é o fator principal relacionado às propriedades do material. A maior afinidade entre as ligações destes materiais fortalece a união dos materiais na sua forma mais íntima, de maneira que a energia de ligação responsável por manter a união na interface dos dois materiais é a ponte e ligação entre estes. Assim, quando o material é solicitado mecanicamente à energia que é atribuída ao material, poderá ser transmitida entre os constituintes do compósito, distribuindo desta forma a solicitação mecânica, o que se traduz em maior resistência por parte do compósito.

A matriz polimérica atua no sentido de manter as fibras unidas e orientadas de acordo com as especificações do projeto. Além disso, a matriz serve também para proteger as fibras durante manipulação e efeito do ambiente. A matriz ainda necessariamente tem de ser capaz de transferir tensões para os agentes de reforço (OREFICE et al., 2012).

2.5.2 Fase dispersa (carga/reforço)

A fase dispersa pode representar para o compósito um reforço aplicado à matriz, pois, dependendo de suas propriedades intrínsecas e das interações entre as fases através da interface, a fase dispersa age realmente como um reforço absorvendo as cargas aplicadas à matriz e melhorando as propriedades mecânicas do compósito. No entanto, o reforço acontece efetivamente quando a fase dispersa é utilizada na forma de fibra, ou seja, possui uma grande razão de aspecto. Para uma fase dispersa formada por partículas com eixos iguais, quando suas dimensões ao longo de várias direções não possuem grandes diferenças entre si, esta passa a agir apenas como carga de enchimento e não contribui efetivamente para a melhoria das propriedades mecânicas do compósito (CALLISTER e WILLIAM, 2008; FURLAN et al., 2012).

Dessa forma os compósitos são divididos quanto à geometria da fase dispersa em: compósitos reforçados por fibras e compósitos com cargas particuladas, cuja fase dispersa, configura-se em uma carga de enchimento que reduz o consumo da matriz substituindo parte dela pela própria carga de enchimento. Nesse caso a fase dispersa, geralmente é constituída de

partículas pequenas de materiais mais baratos oriundos de resíduos industriais, urbanos e da agroindústria (CORREA et al., 2003; CALLISTER e WILLIAM, 2008).

2.5.2.1 Fibras naturais em compósitos

O uso de fibras naturais, como reforço em matriz polimérica, possui grande importância em aspectos ambientais e socioeconômicos. Com o reaproveitamento de fibras que comumente são descartadas, têm-se as vantagens de estimular empregos nas áreas rurais, obter materiais com baixo consumo de energia, sendo esses recicláveis, não tóxicos, biodegradáveis, leves, de fontes abundantes e renováveis (NETO e PARDINI, 2006; BAILLIE, 2005).

As fibras atuam como elementos de reforço, com a finalidade de impor obstáculos à propagação de fissuras, além de funcionar como ponte de transferência dos esforços, garantindo, assim, uma capacidade resistente após a abertura da mesma. De forma simplificada, o componente matricial serve como meio de transferência e homogeneização dos esforços suportados pelos componentes de reforço.

De acordo com Orefice (2012), as fibras são usadas normalmente como agentes sustentadores de tensões e visam a conferir as elevadas propriedades mecânicas dos compósitos. As fibras usualmente utilizadas em compósitos apresentam diâmetros entre 10 e 100 μm . Os aspectos relevantes na decisão sobre a escolha de um ou outro tipo de fibra podem ser assim agrupados: densidade, módulo de elasticidade, resistência a temperatura, resistência a corrosão, entre outras.

As fibras são utilizadas como agente de reforço por possuírem resistências mecânicas elevadas, originadas da dificuldade de se encontrar defeitos (trincas) com elevado tamanho em seções pequenas (OREFICE et. al., 2012).

No Brasil, existe uma grande variedade de fibras vegetais com diferentes propriedades químicas, físicas e mecânicas. As fibras naturais, originadas ou não de resíduos, citadas na literatura especializada como potenciais modificadores de polímeros termoplásticos, são: fibras nativas brasileiras (sisal, coco, juta, rami, curauá bagaço de cana, entre outras), fibras do exterior (kenaf, fique, hemp, entre outras), resíduos de madeira (comercialmente denominados farinha de madeira ou pó de madeira), casca de arroz, entre outras (CARASHI e LEÃO, 2001).

O componente estrutural deve ser rígido, resistente e maleável, e pode ser orgânico ou inorgânico, fibroso ou pulverulento (esférico ou cristalino), com fragmentos achatados

(flocos) ou fibras muito curtas, de dimensões quase moleculares. Sua função é suportar cargas e impedir grandes deformações (MANO, 2000).

O material de reforço, do mesmo modo que as barras de ferro numa viga de concreto, fornece resistência ao compósito, e pode ser de fibras contínuas, curtas, ou pós, esferas etc. A matriz envolve e firma o reforço, dando forma ao compósito. A partir do comprimento mínimo das fibras elas deixam de atuar como reforço e fazem o papel de enchimento ou carga (LEÃO, 1997).

As fibras de sisal, usadas no reforço de matrizes poliméricas, apresentam alta resistência ao impacto e moderada resistência à flexão e tração. O curauá também produz fibra de alta resistência. Mothé e Araújo (2004) apontam que essa fibra, quando misturada a polímeros, origina produtos de menor densidade, com diminuição do custo da matéria-prima, além de provir de fonte renovável.

São cada vez mais numerosas as pesquisas sobre compósitos com fibras vegetais, especialmente aqueles referentes à substituição de fibras sintéticas. Joseph et al. (1999), Sanchez et al. (2004), Mothé e Araújo (2004), e Salazar, Caraschi e Leão (2005) destacam essa substituição, pois as fibras sintéticas, como a fibra de vidro, ou de carbono ou boro, ou nylon e kevlar, ou amianto, apresentam – umas mais, outras menos – custo elevado e alta densidade, além de serem potencialmente poluidoras e não biodegradáveis e abrasivas, além de apresentarem alto custo de reciclagem. As fibras vegetais apresentam características opostas, altamente positivas: têm baixo custo e densidade, são não abrasivas, menos tóxicas, biodegradáveis, podem ser incineradas e facilmente modificadas quimicamente, além de serem fonte de recursos naturais renováveis.

Em pesquisas realizadas por Jayaraman (2003), Leblanc et al. (2006), Leão et al. (2009), Dwivedi e Chand (2009), Bledzki et al. (2010) e Ardanuy et al. (2012), foram feitos diversos estudos sobre o reaproveitamento de fibras naturais com aplicações em compósitos poliméricos, visando à diminuição do uso da matriz, proveniente do petróleo, inclusive com reciclagem ou criação de compósitos reforçados com fibras ou espumas com frações de fibras de até 40% em massa de madeira, abacaxizeiro, linho, sisal, coco, piaçava e palha de trigo.

Carvalho (2004), citado por Pereira e Beraldo (2007), conta-nos que partículas de bambu, na proporção de 2% do compósito, são eficientes como reforço polimérico de poliestireno (PS), com resistência à tração aumentada em 30%, em relação à matriz não reforçada. Compósitos com 6% de partículas de bambu apresentaram resistência à compressão superior a 19%, quando comparados com a matriz sem reforço.

Rodolfo Jr. e John (2006) afirmam que, no mundo, a utilização de madeira como reforço em polímeros tem-se desenvolvido acentuadamente. A Europa e os EUA já têm legislação que limita a queima indiscriminada de derivados celulósicos, normalmente madeira ou seus derivados, como o papel, o que incentiva o reaproveitamento de seus resíduos. Um dos problemas desses países de ponta é a escassez de madeira, o que os leva a incentivar a fabricação e uso de compósitos termoplásticos com madeira (Wood Plastic Composites – WPC), seja para perfis para construção civil ou como componentes automobilísticos, graças ao seu baixo custo, sua versatilidade e beleza, quando comparados com a madeira *in natura*.

Na Europa e nos EUA, a farinha de madeira (Wood Waste Flour – WWF), como carga e reforço em termoplásticos, tem demonstrado maior resistência à umidade e às pragas e insetos, além de poder ser usada em perfis de vários formatos, com melhor estabilidade dimensional. Formam compósitos resistentes a trincas e empenamentos, com maior resistência em piscinas e marinas, dispensam proteção artificial, como vernizes e tintas, além de apresentarem menor custo de manutenção rotineira e de serem totalmente recicláveis. Imitam, em aspecto, a madeira (STARK e SCHENEIDER, 1996; ECKERT, 2000).

Outro polímero que pode ser combinado vantajosamente com fibras naturais é o poliéster. Leão (1997) combinou-o com fibras de madeira e resina fenólica, para produção de chapas não estruturais. Schneider (2002) usaram juta combinada com poliéster, em mistura com polipropileno, como substituição ao pó de serra, concluindo que praticamente toda fibra de origem vegetal pode participar dessa substituição.

Muitas vezes não é do conhecimento do consumidor o uso de fibras naturais em matrizes plásticas. Espera-se que a demanda cresça ainda mais com uma maior divulgação das vantagens desse material.

2.5.3 Interface matriz/reforço

A interface entre as partículas e a matriz polimérica é determinante no resultado das propriedades dos compósitos, pois representa o grau de interação entre as duas fases, e a eficiência com a qual as tensões aplicadas serão transmitidas de uma fase para outra (RODRIGUES, 2011). Assim quanto melhor a adesão carga/matriz, maior a transmissão de cargas entre as fases e maior será a contribuição das propriedades da fase particulada para o comportamento mecânico dos compósitos (MEDEIROS, 2002). Quando não há uma boa interação na interface, não há efetiva transferência de tensões para o reforço e as propriedades dos compósitos ficam limitadas às propriedades da matriz (MULLER et al., 2006). Além

disso, em caso de má fixação das partículas na matriz, se a adesão é baixa, formam-se vazios ao redor das partículas. Esses vazios agem como pontos concentradores de tensões, tendo em vista a interrupção da fase matriz através de sua substituição pontual pela fase dispersa, dando origem a falhas e contribuindo para a redução da resistência mecânica dos compósitos (MEDEIROS, 2002; MONTEIRO e ALMEIDA, 2006).

Os principais mecanismos de interação na interface entre as fases são: adsorção e molhamento, interdifusão, atração eletrostática, ligações químicas e adesão mecânica, quando as cargas possuem muitas irregularidades, como rugosidade, porosidade ou relevos na superfície, gerando boa fixação mecânica à matriz (MEDEIROS, 2002).

2.6 PRINCIPAIS PROCESSOS DE PREPARAÇÃO E MOLDAGEM

Ruch et al. (2004) citam os principais processos para a preparação e moldagem de componentes confeccionados com materiais compósitos de matriz termoplástica reforçados com fibras naturais, que são: extrusão, injeção, plastificação/prensagem, preparação de formulação/injeção e processo NMT (colchão reforçado por fibras naturais), que é utilizado para termoplásticos reforçados com mantas de fibras naturais.

O mais comum é utilizar processos de mistura e de conformação dos compósitos poliméricos reforçados com fibras celulósicas em duas etapas. Numa primeira etapa se faz a incorporação das fibras à matriz, seguido de um processamento de moldagem do produto final. Diversos tipos de processos podem ser empregados em ambas as fases, mas existe uma tendência, tanto na indústria como no desenvolvimento de trabalhos científicos, de se utilizar a extrusão dos materiais em extrusora de dupla rosca, seguido da injeção da mistura para obtenção do produto final (SAHEB e JOG, 1999).

É importante também ressaltar que o uso de diferentes métodos de processamento pode influenciar as propriedades físico-mecânicas dos compósitos.

BLEDZKI et al. (2005) estudaram o comportamento de compósitos confeccionados com PP e madeiras de coníferas e folhosas, submetidas a três diferentes formas de processamento das misturas. Misturador de rolos, misturador termocinético e extrusora de dupla rosca foram usados para homogeneizar as misturas de PP com madeira. Foram também testados três tipos de agentes compatibilizantes. Foi verificado que, dos três processos empregados, a extrusão proporcionou melhores propriedades mecânicas e valores mais baixos de absorção de umidade nos compósitos. Uma análise por microscopia revelou danos aparentes nas fibras submetidas ao processamento por misturador de rolos e por misturador

termocinético, mas, segundo os autores, esses danos não tiveram efeito negativo sobre as propriedades mecânicas do material.

Clemons & Ibach (2004) estudaram os efeitos do tipo de processamento de compósitos de HDPE reciclado reforçado com serragem de pinus, na resistência dos compósitos ao ataque de fungos e absorção de umidade. Os autores verificaram que os compósitos confeccionados por injeção foram mais resistentes em todos os aspectos que os compósitos confeccionados por compressão. Estes, por sua vez, foram mais resistentes que os compósitos confeccionados por extrusão.

2.6.1 Processo por extrusão

De acordo com Billmeyer Jr. (1971), no processo de extrusão, o polímero é propelido continuamente ao longo de uma rosca com regiões de alta temperatura e pressão onde é fundido e compactado, sendo finalmente forçado por uma ferramenta para se obter um produto final. Para se obter a temperatura de fusão do polímero, algum calor externo é aplicado, mas grande parte do calor é gerada por fricção. Máquinas extrusoras modernas podem ser providas de dupla rosca ou múltipla rosca, em que duas roscas giram lado a lado em direções opostas promovendo maior trabalho na massa fundida.

Em alguns casos, em extrusoras com sistema de degasagem, existem aberturas ou saídas de ar em alguns pontos ao longo da rosca, para extração de voláteis do polímero fundido.

Para Schneider (2002), um fator importante para o desempenho econômico de uma linha de extrusão é o seu nível de produção. Segundo o autor, em meados da década de 1990 houve aumento da capacidade das extrusoras paralelas de rosca dupla, usadas na produção de perfis de PVC.

Segundo Rose (2002), os maiores problemas encontrados para extrusão de compósitos fibra-polímeros são as características da fibra, como baixa densidade, fluxo não livre e alta absorção de umidade. Esse fato se agrava quando esses compósitos contêm maior quantidade em peso de fibra do que de resina. Assim, o autor salienta que para extrusão de compósitos fibra-polímeros, o transporte e a mistura dos materiais necessitam de equipamentos diferentes dos utilizados para os plásticos convencionais.

Em Tecnologia (2000) são transcritas as peculiaridades do processo de coextrusão de fibras de madeira e polímeros. Segundo o artigo, extrusoras de roscas duplas (contrarotativas) podem ser utilizadas para compósitos com madeira quando sua umidade for inferior

a 1%. Para umidades maiores e visando melhor homogeneização da mistura, devem ser usadas extrusoras projetadas para compósitos de polímeros com madeira, que possam remover a umidade das fibras, mesmo em níveis altos (8%). Existem duas diferenças básicas dessas extrusoras em relação às convencionais: seu processo inclui uma extrusora principal de dupla rosca paralela contra-rotativa e outra satélite, para o polímero; e suas fibras de madeira são submetidas a uma zona de vazão para remoção da umidade. Com esse tipo de equipamento, segundo o artigo, pode-se conseguir misturas com até 80% de proporção de serragem.

Sabe-se, no entanto, que é possível a mistura de menores proporções de fibras em compósitos utilizando extrusoras convencionais. Numa comparação entre diferentes processos e diferentes tipos de fibras de madeira na fabricação de compósitos com polipropileno, Bledzki et al. (2005) verificaram que o processo de extrusão, numa extrusora de dupla rosca, proporcionou melhores propriedades mecânicas e valores mais baixos de absorção d'água que os processos de fabricação dos compósitos por misturador termocinético ou por misturador de rolos.

Balasuriya e Mai (2001) estudaram as propriedades mecânicas de compósitos produzidos com dois tipos de HDPE, de baixo e médio índice de fluidez (MFI), misturados a partículas (flakes) de madeira de *Pinus radiata*, utilizando dois processos de mistura: com extrusora dupla rosca corrotacional e com misturador rotacional. Os autores concluíram que o processo tem influência nas propriedades mecânicas dos compósitos. O uso de uma extrusora dupla rosca, de alto cisalhamento, proporcionou a confecção de compósitos com até 70% de madeira. Considerando a resistência à tração e à flexão, foram obtidos melhores materiais nas misturas realizadas por extrusão, utilizando HDPE de médio MFI, para os compósitos com até 50% de proporção de madeira. Isso mostra a vantagem da mistura por fusão em alto cisalhamento em relação à mistura termocinética, principalmente pela melhora no molhamento e distribuição das partículas de madeira.

Dentre os processos existentes, a extrusora dupla rosca é o equipamento mais comumente utilizado, cuja configuração e o tipo da rosca são importantes para minimizar o atrito e proporcionar uma boa dispersão da fibra na matriz (CURVELO et al., 2001; CHIELLINI et al., 2001).

2.6.2 Processo por misturador termocinético, tipo K-mixer (Drais/“Dryser”)

O misturador termocinético é um equipamento de alta rotação (sistema de batelada). A fonte de aquecimento é gerada pela energia cinética da alta rotação das palhetas. Esse método

de mistura permite uma distribuição homogênea das fibras dentro da matriz (LUZ, 2008). Rana, Mandal e Bandyopadhyay (2003) utilizaram o misturador termocinético em compósitos de fibras de juta e polipropileno, no qual a ação cisalhante do mecanismo de mistura promoveu a obtenção de compósitos com fibras curtas, resultando em compósitos com excelentes propriedades.

A mistura das matérias-primas acontece dentro de uma cápsula bi-partida do misturador termocinético. As palhetas de homogeneização giram com aproximadamente 2600 rpm na primeira velocidade e chegam até a 5250 rpm na segunda. Essas velocidades tornam o processo de homogeneização extremamente rápido. A primeira velocidade destina-se apenas a tirar o motor e o eixo do ponto de inércia; na segunda, a mistura ocorre, devendo o equipamento ser imediatamente desligado para que não ocorra a degradação (queima) do material. Quando o polímero se funde, as palhetas são travadas, fazendo com que a corrente elétrica aumente. Então os polímeros com diferentes pontos de fusão ou amolecimento são fundidos por causa do atrito, sendo retirados da cápsula logo após a fusão, evitando, assim, que a temperatura se eleve e ocasione degradação térmica ao material (BRANDRUP, IMMERGUT, GRULKE, 1999; RANA, MANDAL, BANDYOPADHYAY, 2003; MULINARI e SILVA, 2007).

2.6.3 Moldagem por injeção

O material, na forma de grãos ou pó, é depositado em um recipiente de alimentação da injetora, (funil), de onde é direcionado para dentro de um cilindro (ABIPLAST, 2016), dentro do qual se encontra uma rosca transportadora recíproca, promovendo seu cisalhamento e homogeneização e contribuindo para sua plastificação. Após esse processo o material é empurrado pela rosca e injetado dentro da cavidade de um molde projetado e confeccionado com as dimensões do produto a ser obtido. Após alguns segundos de resfriamento o molde se abre e libera a peça, com suas dimensões desejadas (OLIVEIRA, 2014). O tempo de espera no molde dependerá basicamente da espessura de parede e da eficiência do resfriamento efetuado, bem como da velocidade de injeção (ABIPLAST, 2016).

Esse é o processo mais utilizado atualmente para transformação de termoplásticos, devido a sua rapidez, à diversidade de peças que podem ser obtidas e à precisão dimensional (OLIVEIRA, 2014).

Nesse processo fabricam-se desde pequenas utilidades domésticas sem requisitos funcionais elevados até peças automobilísticas ou aeroespaciais que demandam precisão

dimensional e características funcionais controladas. Esse processo tem a característica de ser bastante flexível quanto às proporções dos produtos desejados, podendo se injetar desde minúsculas peças até grandes para-choques de carros, além de painéis, peças para o sistema de resfriamento de motores, entre outras (HARADA e YUEKI, 2010).

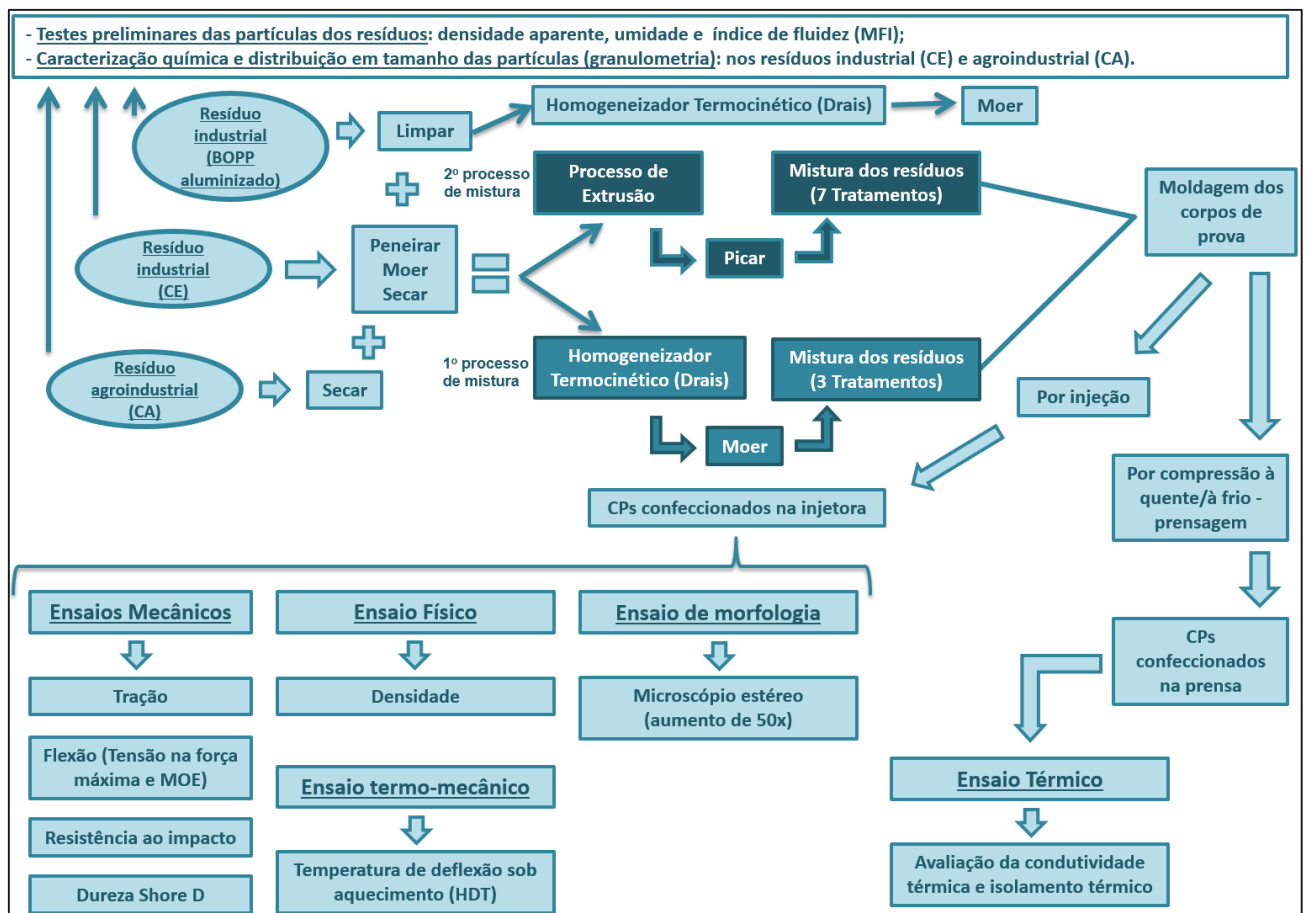
Esse tipo de processamento, associado à utilização de compósitos de fibras naturais, oferece menos desgaste aos equipamentos do que quando realizados com fibras inorgânicas. No caso da injeção, as fibras resultantes geralmente são menores do que 3 mm (BLEDZKI et al., 2008).

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 FLUXOGRAMA DAS ETAPAS DO TRABALHO

A metodologia usada no desenvolvimento do estudo pode ser resumida e observada no fluxograma da Figura 6, onde foram descritas cada uma de suas etapas.

FIGURA 6 - FLUXOGRAMA DAS ETAPAS DO TRABALHO



BOPP = embalagens de café aluminizadas (polipropileno biorientado)

CE = cascas de eucalipto

CA = cascas de arroz; CPs = corpos de prova

FONTE: O autor (2017).

3.2 MATÉRIAS-PRIMAS

Foram utilizados neste trabalho resíduos sólidos de origem industrial e agroindustrial, para confecção de materiais compósitos, visando estudo de sua viabilidade técnica para utilização em diversos segmentos.

3.2.1 Resíduos industriais

3.2.1.1 Embalagens de café aluminizadas (BOPP)

Os resíduos industriais utilizados como matriz foram embalagens de café aluminizadas (polipropileno bioorientado – BOPP – Figura 7), com defeito, geradas no processo de empacotamento industrial. Essas embalagens foram doadas pela empresa Café Tesouro, situada no município de Botucatu-SP.

FIGURA 7 - EMBALAGEM DE CAFÉ ALUMINIZADA (BOPP)



FONTE: O autor (2017).

3.2.1.2 Cascas de eucalipto (CE)

O resíduo industrial utilizado como reforço foi a casca de eucalipto (CE – Figura 8), doado pela empresa PinusTec, situada no município de São Manuel-SP.

FIGURA 8 - CASCA DE EUCALIPTO (CE)



FONTE: o autor (2017).

3.2.2 Resíduo agroindustrial – casca de arroz (CA)

O resíduo agroindustrial, também utilizado como reforço e para melhorar as propriedades térmicas dos painéis, foi a casca de arroz (CA – Figura 9) doado pela empresa Cerealista Guacira Alimentos Ltda, situada na cidade de Santa Cruz do Rio Pardo-SP.

FIGURA 9 - CASCAS DE ARROZ (CA)



FONTE: o autor (2017).

3.3 PRODUÇÃO DAS PARTÍCULAS E SECAGEM

Para obter as partículas de algumas das matérias-primas para produção dos painéis, utilizou-se um moinho granulador horizontal Seibt, modelo 6/230 (Figura 10).

FIGURA 10 - MOINHO GRANULADOR



FONTE: O autor (2017).

Nesse moinho foram moídas as embalagens de café aluminizadas (Polipropileno Biorientado – BOPP –, Figuras 7 e 13-a), depois de passadas no misturador termocinético (Drais – Figura 12), e as Cascas de Eucalipto – CE (Figura 8). Já as Cascas de arroz – CA (Figura 9) foram utilizadas *in natura*, portanto não foram moídas. O BOPP e a CE passaram por processos diferentes antes de serem moídos. As cascas de eucalipto – CE logo que chegaram ao laboratório (Figura 8) foram peneiradas em peneira de 10 mm para eliminação de possíveis galhos, pedras e areia que poderiam ter sido carregados da floresta.

FIGURA 11 - CASCA DE EUCALIPTO (CE) MOÍDA



FONTE: O autor (2017).

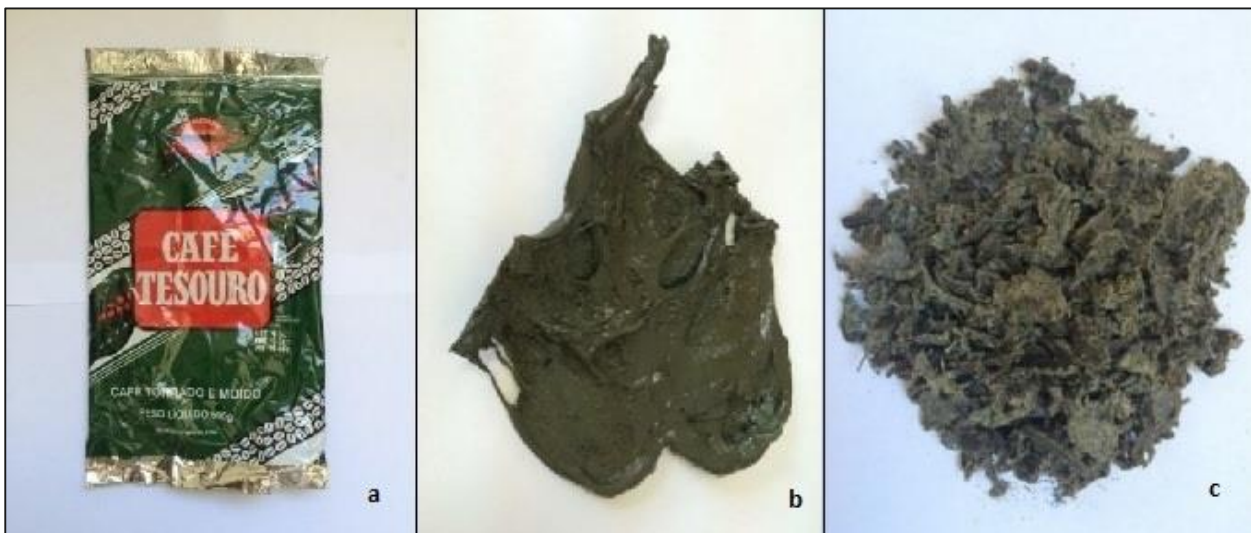
Também foi utilizado um Misturador Termocinético – Drais – Figura 12 Tipo K-Mixer modelo MH-1000 CT. Esse equipamento normalmente é utilizado para melhora na homogeneização de duas ou mais matérias-primas. Porém, para o presente estudo, o misturador foi utilizado para homogeneizar embalagens de café que contêm, principalmente, plástico e alumínio em sua composição. Esse misturador é adaptado com sonda de controle de temperatura com módulo para geração de gráfico de parâmetros de processamento e sistema para remoção de umidade dos materiais durante o processamento. Foram colocadas em média 10 embalagens dentro do compartimento por vez, utilizando temperatura de controle de processamento da massa, que foi de 210 °C e velocidade máxima de 3600 rpm. As embalagens (Figura 13-a) deram origem às borras (Figura 13-b), que foram posteriormente moídas em moinho, dando origem aos grãos utilizados para prensagem (Figura 13-c).

FIGURA 12 - MISTURADOR TERMOCINÉTICO (DRAIS)



FONTE: O autor (2017).

FIGURA 13 - PROCESSO DE HOMOGENEIZAÇÃO DAS EMBALAGENS DE CAFÉ NO MISTURADOR TERMOCINÉTICO



- a) embalagem de café aluminizada (bopp)
b) embalagem fundida após homogeneização (borra)
c) embalagem homogeneizada e moída

FONTE: O autor (2017).

3.4 CARACTERIZAÇÃO FÍSICA, MFI E QUÍMICA DAS PARTÍCULAS DOS RESÍDUOS

3.4.1 Densidade aparente e umidade das partículas dos resíduos

A caracterização das partículas dos resíduos foi feita pela determinação da densidade aparente e umidade das partículas, realizada segundo a norma SCAN-CM 46 (1996), utilizada para resíduos sólidos agroindustriais. Foi calculada a partir da seguinte equação:

$$d = \frac{m}{v} \quad (1)$$

onde:

d: densidade aparente (g/cm³);

m: massa de material seco (g);

v: volume de material seco (cm³).

Para verificação do teor de umidade das partículas das matérias-primas, foi utilizada balança determinadora de umidade UniBloc Moisture Analyzer, modelo MOC63u, da marca Shimadzu (Figura 14). As amostras são aquecidas utilizando fonte de calor (infravermelho) para liberar a umidade. A balança de precisão eletrônica integrada pesa a amostra, antes e depois do aquecimento, e calcula a umidade do material.

FIGURA 14 - BALANÇA DETERMINADORA DE UMIDADE



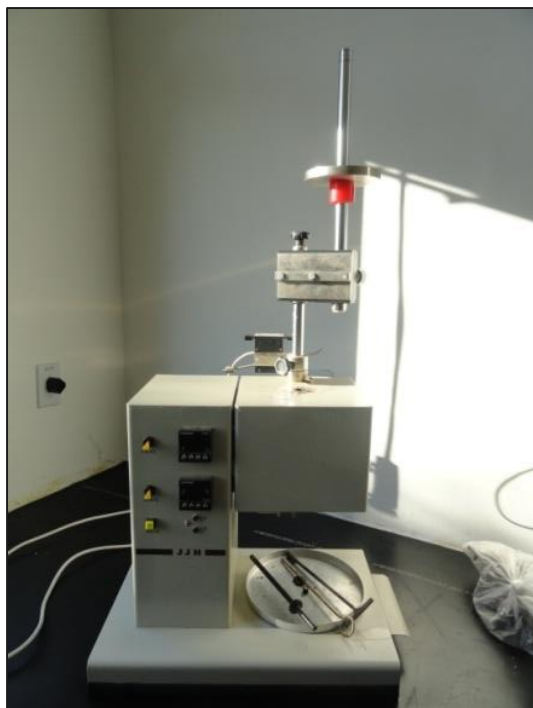
FONTE: <http://www.shimadzu.com.br/analitica/produtos/balance/analizador-umidade/moc63u.shtml> (2014).

3.4.2 Índice de fluidez – MFI (BOPP)

Medidas de índice de fluidez são restritas e a avaliação da viscosidade em função da temperatura e taxa de cisalhamento são fundamentais para otimização de processos como moldagem por injeção e extrusão. Esses dados são de extrema utilidade para avaliação da potência e consumo dos equipamentos e para estimativa do caminho do fluxo e espessura de parede de componentes moldados. Neste trabalho, considerando-se a principal aplicação do compósito em peças moldadas por injeção, é de grande importância estudar o comportamento de índice de fluidez dos compósitos.

No polímero polipropileno biorientado (BOPP) foi feita a análise do índice de fluidez (MFI), segundo a norma ASTM D-1238, com o equipamento Plastômetro Capilar JJH (Figura 15), para determinar a medida do índice de fluidez no material. Foram utilizados os seguintes parâmetros: temperatura de 230 °C, peso de 2,16 kg e tempo de corte de 10 segundos. Para eliminar bolhas de ar no orifício, foi utilizado um pistão que compactou o material. Pesou-se a massa que flui através do orifício de um capilar em 10 minutos (g/10 min), mantendo constantes pressão e temperatura. Foram utilizados 10 corpos de prova.

FIGURA 15 - PLASTÔMETRO CAPILAR



FONTE: O autor (2014).

Uma quantidade de material pré-estabelecida na forma de grânulos, pó e outros alimentou um canal com geometria padronizada e aquecido na temperatura de teste. O material foi compactado, fundido e extrudado através de uma matriz depois de um tempo pré-estabelecido (tempo de residência). A massa ou volume extrudado foi especificado por unidade de tempo.

3.4.3 Caracterização química dos resíduos (CE e CA)

A caracterização química das cascas de arroz e de eucalipto foi realizada no Laboratório de Análises Químicas, do Departamento de Ciência Florestal, da Faculdade de Ciências Agrônomicas – FCA – Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” (UNESP), Câmpus de Botucatu-SP.

O material utilizado para as análises químicas foi o que passou pela peneira de malha 40 mesh e ficou retido na malha de 60 mesh, atendendo o preconizado pelas normas TAPPI (1999) e ABTCP (1974) nas determinações de extrativos totais, lignina e holocelulose. A fração de extrativos totais foi determinada por meio da norma ABTCP M3/69 (ABTCP, 1974). Já a determinação da lignina Klason insolúvel em ácido foi realizada por meio da norma TAPPI T222 om-88 (TAPPI, 1999; SANSÍGOLO; BARREIROS, 1998).

A porcentagem dos diferentes constituintes dos materiais lignocelulósicos (celulose, hemiceluloses, lignina e extrativos – compostos orgânicos e inorgânicos) afetaram a qualidade e uso do produto final.

3.4.4 Distribuição em tamanho das partículas – granulometrias

A distribuição em tamanho das partículas foi determinada utilizando-se as partículas das cascas de eucalipto e de arroz.

Uma amostra de 100 gramas de cada resíduo foi peneirada em peneira vibratória comercial (Figura 16), seguindo a norma ABNT-NBR 7217 – Associação Brasileira de Normas Técnicas (NBR, 1987), com malhas de 3,35 mm, 2 mm, 1 mm, 0,85 mm, 0,5 mm, 0,425 mm, 0,250 mm, 0,212 mm, 0,125 mm e 0,105 mm.

FIGURA 16 - PENEIRA VIBRATÓRIA



FONTE: O autor (2014).

Da distribuição em tamanho das partículas foram obtidos o módulo de finura e a dimensão máxima das partículas. O módulo de finura é dado pela equação:

$$MF = \frac{\sum PRA}{100} \quad (2)$$

onde:

MF: módulo de finura;

PRA: porcentagem retida acumulada (%).

A dimensão máxima, por definição, é dada pela abertura da peneira que apresenta o maior valor de porcentagem retida acumulada não superior a 5%.

3.5 PREPARAÇÃO DOS COMPÓSITOS

Os materiais compósitos foram desenvolvidos no Laboratório de Resíduos Sólidos e Compósitos (RESIDUALL), do Departamento de Engenharia de Bioprocessos e Biotecnologia, da Faculdade de Ciências Agrônômicas – FCA – Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” (UNESP), Câmpus de Botucatu-SP.

Os compósitos foram confeccionados combinando-se a matriz (BOPP) e os reforços (partículas dos resíduos de CE e de CA), em diferentes proporções-formulações apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1 - Composição dos 10 tratamentos

Equipamentos	Tratamentos	Cod.	Matriz (elemento matricial)	Reforços (elemento estrutural)	
			% (em massa)	% (em massa)	
		1 a 10	Resíduos industriais		Resíduo agroindustrial
			BOPP	CE	CA
Extrusora + injetora	BOPP 100	1	100		
	BOPP 90 + CE 10	2	90	10	
	BOPP 80 + CE 20	3	80	20	
	BOPP 70 + CE 30	4	70	30	
	BOPP 90 + CA 10	5	90		10
	BOPP 80 + CA 20	6	80		20
	BOPP 70 + CA 30	7	70		30
Drais + injetora	BOPP 100	8	100		
	BOPP 70 + CE 30	9	70	30	
	BOPP 70 + CA 30	10	70		30

FONTE: O autor (2017).

3.5.1 Mistura das matérias-primas

3.5.1.1 Processo utilizando o equipamento Drais

Os materiais compósitos são constituídos pelas misturas entre as três matérias-primas: BOPP, CA e CE, conforme descritos na Tabela 1. Para o processamento das três últimas formulações (Tratamentos 8, 9 e 10 - Tabela 1), foi utilizado o equipamento misturador termocinético a uma temperatura de 210 °C (Drais – Figura 12), seguindo o mesmo esquema já adotado no processamento das embalagens de café – BOPP. As misturas entre as matérias-primas (Tabela 1) deram origem às borras (Figura 17-a), que foram posteriormente moídas em moinho, dando origem aos grãos utilizados para prensagem (Figura 17-b). Entre a mistura de cada tratamento foi feita a limpeza do misturador, evitando contaminações.

FIGURA 17 - PROCESSO DE HOMOGENEIZAÇÃO DOS TRATAMENTOS 8, 9 E 10



a) material fundido a 210 °C após homogeneização (borra)

b) material homogeneizado e moído

FONTE: O autor (2016).

3.5.1.2 Processo utilizando o equipamento extrusora

Para o processamento das sete primeiras formulações (Tratamentos 1, 2, 3, 4, 5, 6 e 7 – Tabela 1) foi utilizada uma extrusora dupla rosca corrotacional, 25 mm, modelo ZSK-25 (Figura 18-a), com alimentação simultânea no mesmo funil da matriz (BOPP) e dos reforços (CE e CA) conforme condições de processo descritas a seguir. A temperatura utilizada para todas as formulações e para todas as zonas onde se encontram as resistências também foram

as mesmas, sendo a mesma temperatura utilizada para o polímero PP, fixada em 160 °C (do início onde se abastece com a mistura até o bico onde o material já sai extrudado). A velocidade de dosagem variou entre 90 rpm e 120 rpm. Os tratamentos foram executados individualmente e a cada mudança de tratamento a rosca foi limpa com polipropileno virgem e esvaziada. O compósito extrudado foi resfriado ao ar livre, sem contato com água (Figura 18-b) e, logo após, foi moído em um triturador de marca SAGEC Máquinas LTDA, modelo SG 70 (Figura 18-c), dando origem aos pellets (Figura 18-d).

FIGURA 18 - PROCESSO DE EXTRUSÃO



a) extrusora dupla rosca, marca Coperion, modelo ZSK 25, l/d 36
 b) compósito sendo resfriado dentro do laboratório
 c) triturador peletizador, marca Sagec; d) pellets saídos do triturador

FONTE: O autor (2016).

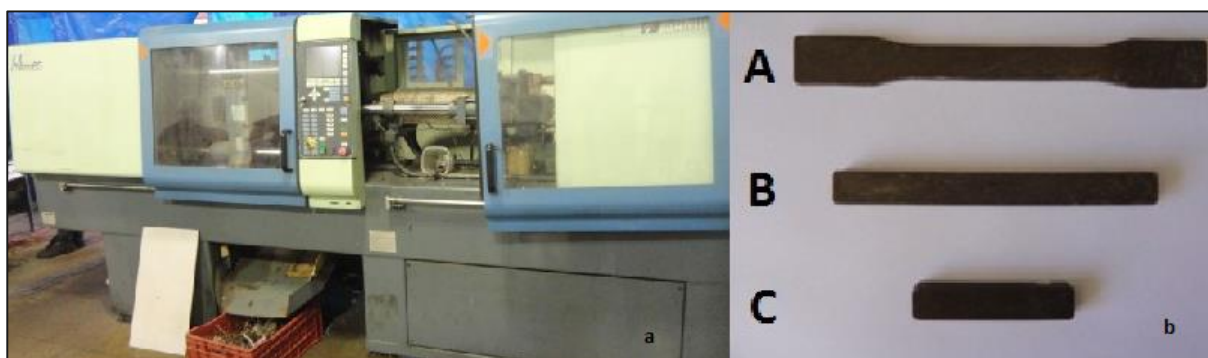
3.6 MOLDAGEM DOS CORPOS DE PROVA

3.6.1 Injeção

Na sequência os pellets foram colocados no alimentador de uma injetora, marca Sandretto do Brasil Ltda., modelo Micro 65 (Figura 19-a), dando origem por injeção aos

corpos de prova (Figura 19-b) para os ensaios mecânicos (flexão, tração, impacto Izod e dureza Shore D). A temperatura utilizada no cilindro da injetora foi de 160 °C e no bico foi de 190 °C. A velocidade de injeção foi de 70 cm³/s. A injetora tem um sistema dosador que define, em milímetros, a vazão de material que é injetado no molde. Esse valor foi de 70 mm.

FIGURA 19 - MOLDAGEM DOS CORPOS DE PROVA POR INJEÇÃO



a) injetora marca Sandretto, modelo Micro 65, do laboratório Residuall

b) corpos de prova para os ensaios mecânicos confeccionados na injetora (A – tração; B – flexão; C – resistência ao impacto, dureza Shore D)

FONTE: O autor (2016).

3.6.2 Compressão a quente – prensagem

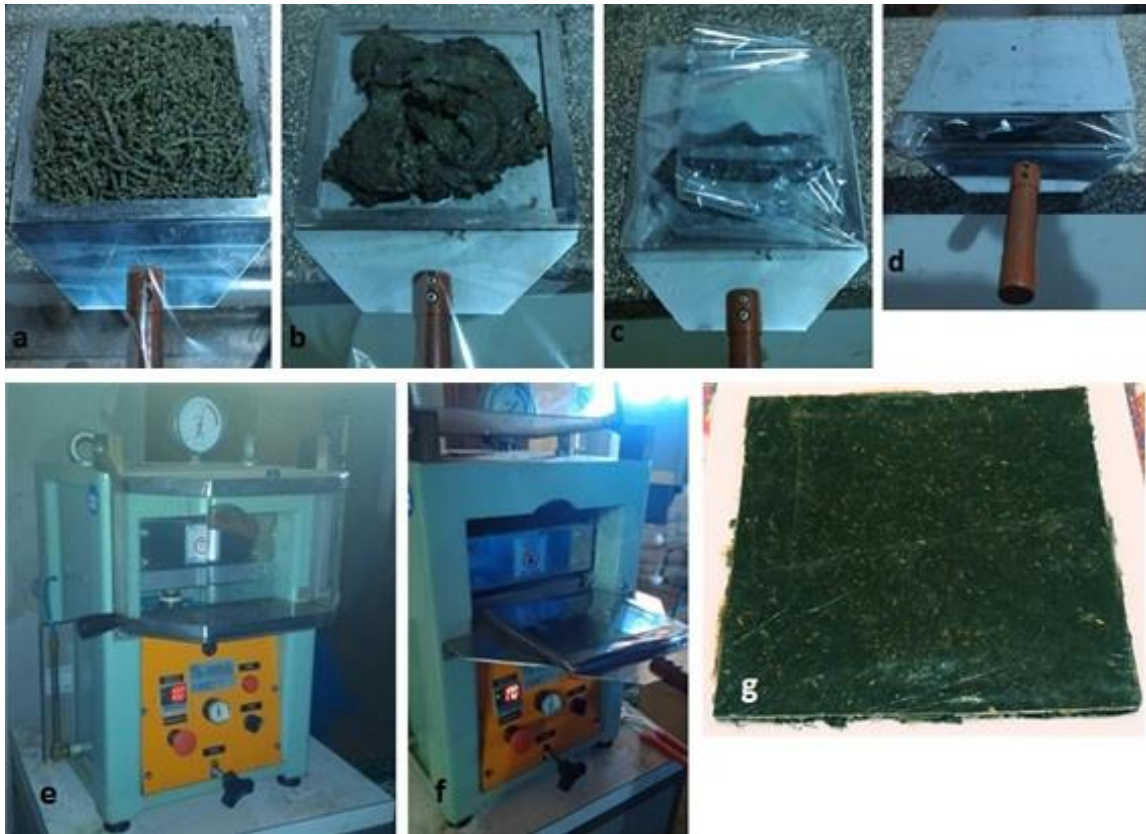
Para confeccionar os corpos de prova para o ensaio de avaliação da resistência à transmissão térmica, foi utilizada uma prensa hidropneumática 8 toneladas – Q/F (Figura 20-e e 20-f), da empresa MH Equipamentos, pertencente ao Laboratório de Resíduos Sólidos e Compósitos – RESIDUALL, do Departamento de Engenharia de Bioprocessos e Biotecnologia – FCA/UNESP, Botucatu-SP.

As dimensões dos painéis foram de (17 x 17 x 0,5) cm³, tempo de prensagem de 10 minutos e pressão de prensagem de 8 toneladas. A densidade almejada foi a mesma alcançada nos corpos de prova dos ensaios mecânicos, de 1,18 g/cm³.

Os painéis foram confeccionados seguindo as formulações da Tabela 1, porém apenas os Tratamentos 1, 7, 8 e 10 foram prensados, ou seja, dois tratamentos produzidos na Extrusora (Tratamentos 1 e 7) e dois tratamentos produzidos na Drais (Tratamentos 8 e 10), de acordo com as formulações da Tabela 1. De acordo com testes preliminares de prensagem, foi constatado que a temperatura ideal foi de 180 °C.

Os passos para o processo de prensagem a quente são apresentados a seguir:

FIGURA 20 - ILUSTRAÇÃO DO PROCESSO DE PRENSAGEM A QUENTE



- a) chapa de alumínio, espaçador de 0,5 cm, acetato e pellets dos tratamentos confeccionados na extrusora (Tratamentos 1 e 7 colocados separadamente)
- b) chapa de alumínio, espaçador de 0,5 cm, acetato e “pasta” dos tratamentos confeccionados no misturador termocinético Drais (Tratamentos 8 e 10 colocados separadamente)
- c) folha de acetato dobrada fechando o colchão para ser encaminhado a prensagem
- d) colchão com a chapa de alumínio na parte superior, pronto para ser encaminhado a prensagem
- e) prensagem a quente do painel a 180 °C, tempo de 10 minutos e 8 toneladas de pressão
- f) depois da prensagem a quente o painel é inserido na abertura inferior da prensa, onde é prensado a frio por 2 minutos para estabilizar e não ocorrer o efeito *spring back*, ou seja, deformação elástica do painel
- g) painel pronto para ser mapeado de acordo com o ensaio para avaliação da condutividade térmica

FONTE: O autor (2016).

3.7 CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA, TÉRMICA E MORFOLÓGICA DOS COMPÓSITOS

3.7.1 Ensaio mecânicos

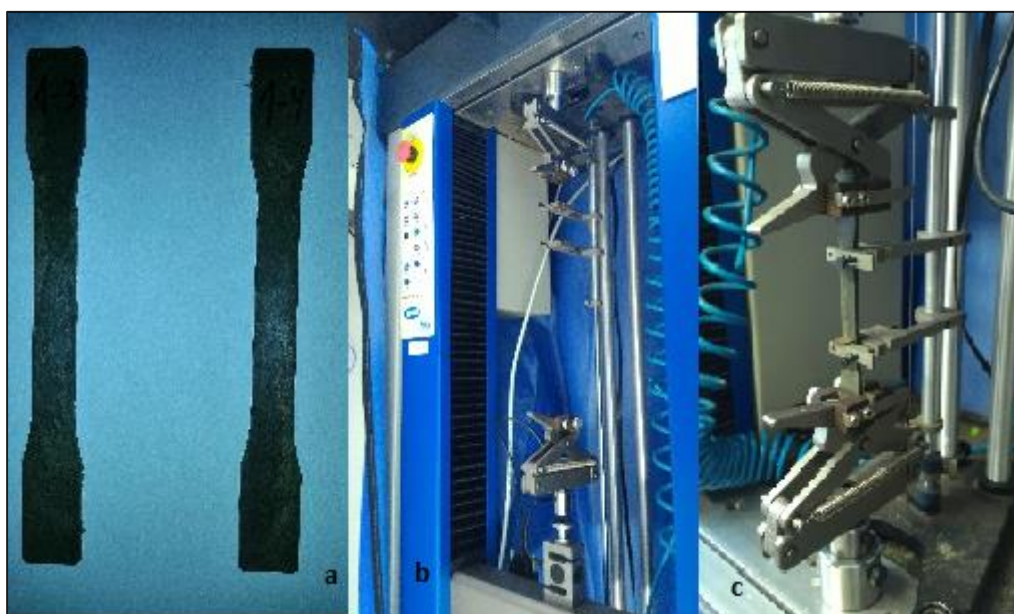
3.7.1.1 Resistência à tração

Os ensaios de tração dos corpos de prova foram realizados de acordo com a norma ASTM D638-14 (ASTM, 2014). Foram utilizados 8 corpos de prova para cada tratamento,

que foram acondicionados em ambiente com temperatura controlada de 25 °C por 48 horas. Com base na referida norma, os corpos de prova foram confeccionados com 17,0 cm de comprimento, 1,3 cm e 1,8 cm (largura menor e maior, respectivamente) e 0,30 cm de espessura (Figura 21-a).

Os ensaios foram realizados em Máquina Universal de Ensaio Servo-mecânica, marca EMIC, modelo DL-2000 (Figuras 21-b e 21-c), com capacidade de 30 kN e a uma velocidade de deslocamento da travessa de 5 mm/min. Foi utilizado o software Tesc, versão 3.01 para análise e tratamento dos dados. Esse ensaio foi realizado no Laboratório de Resíduos Sólidos e Compósitos (RESIDUALL), do Departamento de Engenharia de Bioprocessos e Biotecnologia da Faculdade de Ciências Agrônômicas da UNESP, Câmpus Botucatu-SP.

FIGURA 21 - ENSAIO DE TRAÇÃO



- a) corpos de prova para o ensaio de tração
- b) EMIC DL-2000 – para os ensaios de tração
- c) ensaio de tração

FONTE: O autor (2016).

3.7.1.2 Resistência (MOR) e rigidez (MOE) à flexão

O ensaio de flexão foi realizado de acordo com a norma ASTM D790-10 (ASTM, 2010a). Foram utilizados 8 corpos de prova para cada tratamento. Com base na referida norma, os corpos de prova foram confeccionados com 12,4 cm de comprimento, 1,2 cm de largura e com 0,60 cm de espessura (Figura 22-a).

Esse ensaio foi realizado em uma Máquina Universal de Ensaio Servo-mecânica, marca EMIC, modelo DL-2000 (Figuras 22-b e 22-c), com capacidade de 30 kN e velocidade de deslocamento da travessa de 5 mm/min, com vão de 10 cm, no Laboratório de Resíduos Sólidos e Compósitos – RESIDUALL, do Departamento de Engenharia de Bioprocessos e Biotecnologia – FCA/UNESP, Botucatu-SP.

FIGURA 22 - ENSAIO DE FLEXÃO



- a) corpos de provas para o ensaio de flexão
 b) EMIC DL-2000 – para os ensaios de flexão
 c) ensaio de flexão

FONTE: O autor (2016).

A partir do ensaio de flexão estática, foram obtidos os valores de MOE (módulo de elasticidade) e MOR (módulo de ruptura – tensão na força máxima), que são dados pelas equações 3 e 4, respectivamente.

$$MOE = \frac{P * l^3}{48 * f * I} \quad (3)$$

onde:

P: carga (MPa);

l: distância entre apoios (mm);

f: deformação (mm);

I: momento de inércia (para seções retangulares $I=b.h^3/12$).

Onde b é a largura e h é a espessura dos corpos de prova.

$$MOR = \frac{1,5 * P * l}{b * h^2} \quad (4)$$

onde:

P: força de ruptura (N);

l: distância entre apoios (mm);

b: largura do corpo de prova (mm);

h: espessura do corpo de prova (mm).

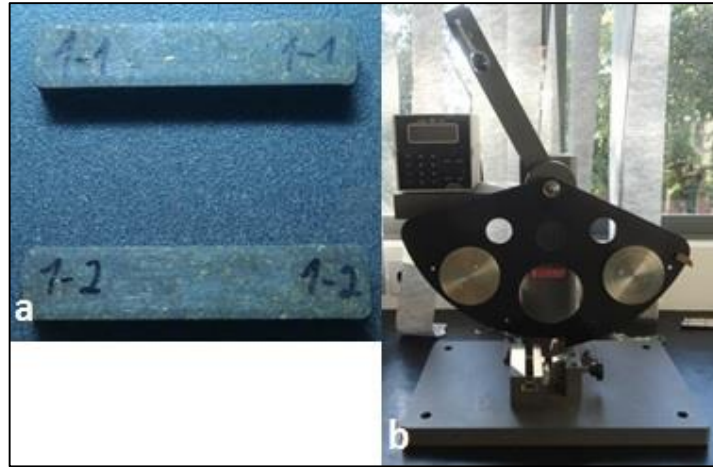
3.7.1.3 Resistência ao impacto

Os ensaios de resistência ao impacto foram realizados de acordo com a norma ASTM D256-10 (ASTM, 2010b). Foram utilizados 12 corpos de prova para cada tratamento. Com base na referida norma, os corpos de prova foram confeccionados com 6,30 cm de comprimento, 1,30 cm de largura e com 0,60 cm de espessura (Figura 23-a).

Foi utilizado um equipamento de impacto da marca Tinius & Olsen, modelo 892 (Figura 23-b), pertencente ao Laboratório de Resíduos Sólidos e Compósitos – RESIDUALL, do Departamento de Engenharia de Bioprocessos e Biotecnologia – FCA/UNESP, Botucatu-SP.

Nos ensaios de impacto Izod, um pêndulo (Figura 23-b) com um peso determinado é jogado contra a amostra e a energia necessária para romper a amostra é determinada através da perda de energia cinética do pêndulo (CHAWLA, 1998).

FIGURA 23 - ENSAIO DE RESISTÊNCIA AO IMPACTO IZOD



a) corpos de provas para o ensaio de impacto
 b) máquina para o ensaio de resistência ao impacto

FONTE: O autor (2016).

3.7.1.4 Dureza Shore D

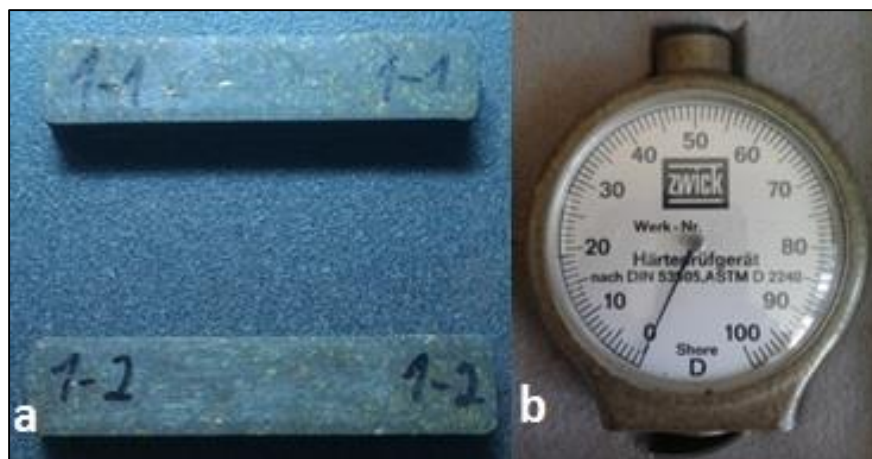
Para o ensaio de dureza Shore D foram utilizados os mesmos corpos de prova do ensaio de resistência ao impacto (Figura 24-a), seguindo norma ASTM D-2240-15 (ASTM, 2015).

Para realização do ensaio foi utilizado o durômetro de bolso (Figura 24-b), da marca Zwick, pertencente ao Laboratório de Resíduos Sólidos e Compósitos – RESIDUALL, do Departamento de Engenharia de Bioprocessos e Biotecnologia – FCA/UNESP, Botucatu-SP.

As escalas Shore A e D são as mais usadas para medir a dureza de polímeros, elastômeros e borrachas.

A ASTM D 2240 contém 12 escalas, dependentes da intenção de uso, sendo elas: A, B, C, D, DO, E, M, O, OO, OOO, OOO-S e R. Cada escala resulta em um valor entre 0 e 100, sendo que valores maiores indicam um material mais duro.

FIGURA 24 - ENSAIO DE DUREZA SHORE D



a) corpos de provas para o ensaio de dureza
b) durômetro

FONTE: O autor (2016).

3.7.2 Ensaio térmico

3.7.2.1 Condutividade térmica

Para avaliação da condutividade térmica foram retirados três corpos de prova de cada painel e o ensaio foi realizado de acordo com a norma ASTM E1530 (ASTM, 2011). Com base na referida norma, os corpos de prova com dimensões de 5,00 cm de diâmetro e 0,50 cm de espessura foram confeccionados em uma prensa hidropneumática (Figura 20-e).

A condutividade térmica equivale à quantidade de calor Q transmitida através de uma espessura L , numa direção normal a superfície de área A , devido a uma variação de temperatura ΔT quando a transferência de calor se deve apenas à variação de temperatura. A medição da condutividade térmica foi baseada na equação abaixo:

$$K = \frac{\Delta Q}{A \cdot \Delta t} \cdot \frac{L}{\Delta T} \quad (5)$$

A unidade de condutividade térmica segundo o sistema internacional de unidades é o watt (W) por metro (m) e por kelvin (k) = (W/m.k).

Os ensaios para a avaliação da condutividade térmica foram realizados no equipamento Determinador de condutividade térmica, do inglês “Determination of thermal conductivity” - DTC 300 (Figura 25), adquirida da empresa TA Instruments, pertencente ao

Laboratório de Construções Rurais e Ambiente, da Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos – FZEA/USP, Câmpus Pirassununga-SP. A faixa de medição desse equipamento vai de 0,1 a 40 W/m.K. O ensaio foi executado com uma temperatura de 30 °C, simulando a temperatura de um ambiente a 30 °C.

A pasta térmica utilizada (Figura 25-c) é um composto químico elaborado com elementos com propriedades de conduzir bem o calor, ou seja, são bons condutores de calor. Foi utilizada para que a temperatura de 30 °C estipulada no equipamento fosse conduzida do equipamento até o corpo de prova.

FIGURA 25 - EQUIPAMENTO DTC 300 E PROCESSO PARA AVALIAÇÃO DA CONDUTIVIDADE TÉRMICA



- a) equipamento DTC 300
- b) cp sem pasta térmica
- c) cp com pasta térmica
- d) local para inserir o cp
- e) cp no local pronto para ser ensaiado
- f) cp sendo ensaiado

FONTE: O autor (2016).

3.7.3 Ensaio de morfologia

Para o ensaio de morfologia foi utilizado um Microscópio estéreo (Figura 26), marca Carl Zeiss Stemi™, modelo 2000, com lente ocular de focagem de 10x (23 mm – campo

largo), utilizado para ciências dos materiais. A ampliação utilizada foi de 50 vezes em corpos de provas fraturados no ensaio de resistência ao impacto.

Os ensaios foram realizados no Departamento de Proteção de Plantas, da Faculdade de Ciências Agronômicas (FCA/UNESP), Câmpus de Botucatu-SP.

FIGURA 26 - MICROSCÓPIO ESTÉREO



FONTE: Site Fishers Scientific, 2016.

3.7.4 Ensaio termomecânico

3.7.4.1 Ensaio de Temperatura de deflexão sob aquecimento – HDT

O ensaio de temperatura de deflexão sob aquecimento (HDT – Heat Deflexion Temperature) é um ensaio termomecânico e foi realizado de acordo com a norma ASTM D648-16 (ASTM, 2016). Foram utilizados 4 corpos de prova para cada tratamento. Com base na referida norma, os corpos de prova foram confeccionados com 12,4 cm de comprimento, 1,2 cm de largura e com 0,60 cm de espessura (Figura 27-a).

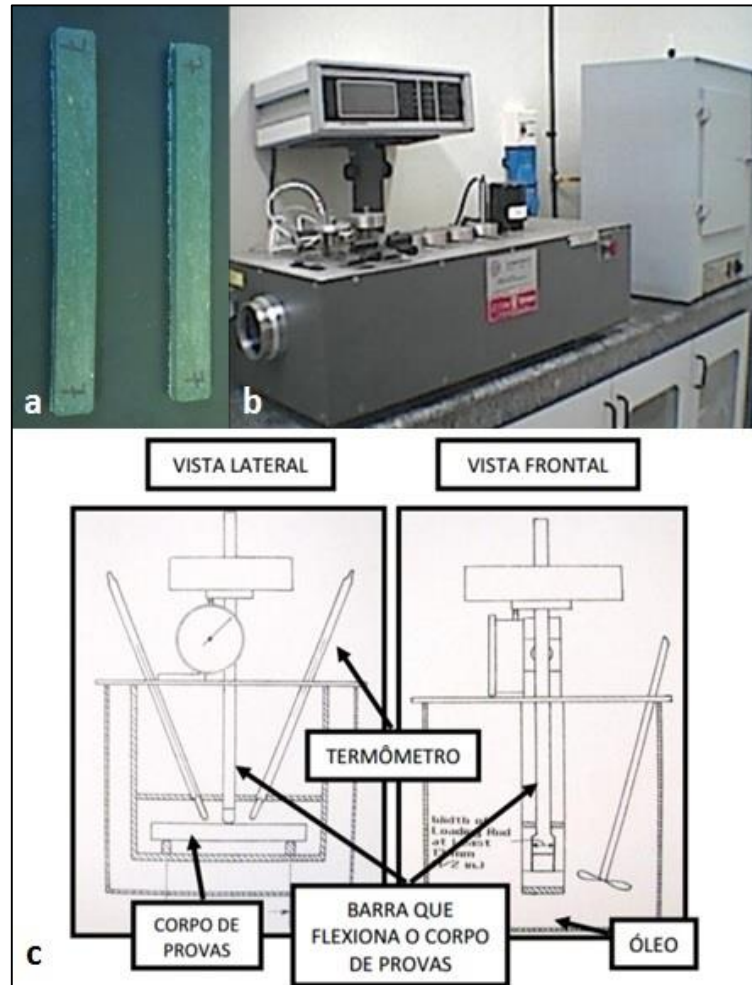
Esse ensaio foi realizado em um equipamento Tinius Olsen HDTUL, Modelo HD94/398 (Figura 27-b), no Laboratório de Análises Químicas (CQuiM), do IPT – Instituto de Pesquisas Tecnológicas, situado na cidade de São Paulo/SP.

O equipamento realiza o ensaio de flexão a carga constante e temperatura variável. Consiste de um banho de óleo silicone termostatzado, que possui um resfriamento interno, por meio de uma serpentina por onde passa água à temperatura ambiente. Esse equipamento mede a temperatura necessária para que um corpo de prova obtenha certa deflexão, sob carga constante.

A temperatura de deflexão térmica é aquela na qual se observa um decréscimo pronunciado das propriedades mecânicas de um corpo de prova. Quanto mais alta a

temperatura, maior a resistência do material para essa propriedade. De acordo com a norma ASTM D-648, a HDT é determinada em graus Celsius. A Figura 27-c apresenta o desenho esquemático do interior do equipamento para caracterização térmica de acordo com a norma ASTM D-648.

FIGURA 27 - ENSAIO DE HDT



- a) corpos de provas para o ensaio de HDT
 b) equipamento para temperatura de deflexão sob aquecimento (HDT)
 c) desenho esquemático do interior do equipamento para caracterização térmica de acordo com a norma ASTM D648-16

FONTE: O autor (2016).

3.8 DELINEAMENTO ESTATÍSTICO E ANÁLISES

Os dados foram submetidos pelo teste de normalidade Shapiro-Wilk do procedimento UNIVARIATE NORMAL do programa SAS (version 9.4; SAS Inst. Inc., Cary, NC). Os resultados indicaram que todos os dados foram distribuídos pela normalidade ($W > 0,90$). No primeiro experimento, comparação entre os resultados produzidos nos equipamentos Extrusora + Injetora e Drais + Injetora, entre Resíduos e interação Processo/Resíduo, os dados foram analisados utilizando o procedimento MIXED (SAS Inst. Inc., Cary, NC) e o comando Satterthwaite para determinar os graus de liberdade do denominador para testes de efeito fixo. Os resíduos utilizados e o tipo de processamento foram considerados efeitos fixos. Foram analisados os dados usando as repetições (resíduo*processamento) como efeitos aleatórios. Os resultados são reportados como média dos quadrados mínimos (LSMEANS) e separados pela opção de diferentes probabilidades (PDIFF). Para todas as análises, significâncias foram consideradas se $P < 0,05$. No segundo experimento, comparação entre os tratamentos produzidos na Extrusora + Injetora com 0, 10%, 20% e 30% CE e CA, polinômios ortogonais foram utilizados para testar o efeito linear, quadrático e cúbico dos diferentes níveis de inclusão dos resíduos. Equações foram geradas utilizando o PROC REG do SAS e as melhores escolhidas por meio do coeficiente de determinação e os valores do teste t. As barras de erro são apresentadas como erros padrões (EP) e foram determinadas usando o procedimento PROC MEAN do SAS.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na discussão dos resultados desta pesquisa, as seguintes abreviaturas são utilizadas para facilitar a interpretação dos tratamentos efetuados:

BOPP = polipropileno biorientado, ou embalagens de café aluminizadas (resíduo industrial);

CE = cascas de eucalipto (resíduo industrial);

CA = cascas de arroz (resíduo agroindustrial).

BOPP é o resíduo utilizado como matriz; CE e CA são os resíduos empregados como reforço. Os números que acompanham as abreviaturas determinam as porcentagens de matriz e reforço utilizadas (10, 20, 30, 70, 80, 90 ou 100).

4.1 CARACTERIZAÇÃO DAS PARTÍCULAS DOS RESÍDUOS

4.1.1 Caracterização física – densidade aparente e umidade das partículas

As propriedades iniciais das partículas empregadas na confecção dos materiais compósitos são apresentadas na Tabela 2.

TABELA 2 - RESULTADOS DOS ESTUDOS DAS PARTÍCULAS: DENSIDADE E UMIDADE

Propriedade avaliada	BOPP	CE	CA
Densidade aparente (g/cm ³)	0,26	0,31	0,35
Teor de umidade (%)	0,90	2,13	1,87

FONTE: O autor (2017).

4.1.2 Índice de fluidez (MFI) do BOPP

A Tabela 3 apresenta o índice de fluidez (MFI) do BOPP, deste trabalho e de trabalhos encontrados na literatura. O MFI foi realizado com o objetivo de verificar o potencial de processamento dos materiais.

TABELA 3 - VALORES DE ÍNDICE DE FLUIDEZ (MFI) OBTIDOS E ENCONTRADOS NA LITERATURA PARA O POLIPROPILENO BIORIENTADO (BOPP)

Referência	Origem do BOPP	Índice de fluidez (MFI) (g/10min)	Norma
O autor (2017)	Embalagens de café aluminizadas	3,1	ASTM D1238
Cordebello (1999)	Sem especificação adicional	3	-
Kosar (2015)	Sem especificação adicional	3 a 3,8	ISO 1133
Opal (2016)	Embalagem flexível e filmes aluminizados	3,4	ASTM D1238

FONTE: O autor (2017).

Verificou-se que no BOPP ocorre maior dificuldade de escoamento e, conseqüentemente, menor fluidez, ou seja, o material possui alta viscosidade.

Com o procedimento da ASTM D1238 não foi possível mensurar a fluidez dos materiais compósitos. Provavelmente isso tenha sido condicionado pelo baixo índice de fluidez do BOPP – matriz – ainda antes da adição do reforço. Em trabalho de Caraschi et al. (2015) o índice de fluidez do PP puro foi de 12,2 g/10 min. Com adição de 15% de fibra (capim-elefante) esse índice caiu para 8,54 g/10 min, ou seja, houve um decréscimo de 30% na fluidez.

Logo, pelo fato de o BOPP sem reforço apresentar baixa fluidez (alta viscosidade), a adição de fibra aumenta a viscosidade e isso dificulta o escoamento do material compósito.

Uma forma de aumentar o índice de fluidez de um material se dá com adição de um agente de acoplamento, como o anidrido maleico, que aumenta o escoamento desse material; porém nenhum agente foi utilizado neste trabalho.

4.1.3 Caracterização química dos resíduos – CE e CA

As cascas de eucalipto e de arroz *in natura* foram caracterizadas quimicamente para obtenção dos valores percentuais de celulose, hemicelulose, lignina, cinzas e extrativos (Tabela 4).

TABELA 4 - COMPOSIÇÃO QUÍMICA COMPLETA DAS CASCAS DE EUCALIPTO E DE ARROZ, EM PORCENTAGEM

<i>Cascas in natura</i>	Teores (%)									
	C	Cc	Clc	H	Ch	Hlc	L	Cl	Llc	E
CE	39,21	7,99	36,08	80,66	2,80	78,40	23,26	2,15	22,76	1,77
CA	47,16	14,12	33,04	83,89	19,58	64,31	34,27	11,87	22,40	4,78

FONTE: O autor (2017).

NOTA: (C) celulose; (Cc) cinzas na celulose; (Clc) celulose livre de cinzas; (H) holocelulose; (Ch) cinzas na holocelulose; (Hlc) holocelulose livre de cinzas; (L) lignina; (Cl) cinzas na lignina; (Llc) lignina livre de cinzas; (E) extrativos.

A combinação de hemicelulose com celulose é chamada de holocelulose. A hemicelulose se diferencia da celulose por possuir unidades de açúcares diferentes daquelas com cinco ou seis átomos de carbono (SANTOS et al., 2001). A holocelulose é a celulose juntamente com os outros polissacarídeos. Os polissacarídeos não celulósicos são denominados de hemiceluloses. Através do processo de deslignificação, ou seja, da remoção da lignina, é possível a obtenção da holocelulose (KLOCK, et al., 2005). Os métodos mais utilizados são o que aplicam solução acidificada de cloreto de sódio e o método clorito/ácido acético, que consiste na ação do clorito de sódio em meio ácido, liberando dióxido de cloro, que ataca a lignina para produzir um produto solúvel.

A Tabela 5 apresenta a composição química das cascas de eucalipto e de arroz utilizadas nesta pesquisa.

TABELA 5 - COMPOSIÇÃO QUÍMICA DAS CASCAS DE EUCALIPTO E DE ARROZ UTILIZADAS NESTE TRABALHO (LIVRES DE CINZAS) E DE MATERIAIS LIGNOCELULÓSICOS ENCONTRADOS NA LITERATURA

Referências	Amostras	Celulose	Hemicelulose	Lignina	Cinzas	Extrativos
O autor (2017)	Casca de eucalipto	36,08	42,32	22,76	-	1,77
O autor (2017)	Casca de arroz	33,04	31,27	22,40	-	4,78
Houston (1972)	Casca de arroz	50	-	30	-	-
Cruz et al. (2000) Salazar, Silva G. e Silva M. (2005)	Palha de milho	-	-	8,79	1,52	-
Trugilho, Lima e Mori (2003); Mori et al. (2002)	Madeira de eucalipto	-	-	31,77	0,17	6,71
Demirbas (2003)	Casca de avelã	26,70	30,29	43,01	-	-
Demirbas (2003)	Casca de oliveira	23,08	21,63	55,29	-	-
Brum, et al. (2007) Pereira (2008)	Grão de café	-	-	20	1,37	7
Pitarelo (2007) Marabezi et al. (2009)	Bagaço de cana	-	-	39,70	11,70	11,50
Silva (2013)	Casca de arroz	32	21	22	15	-
Silva et al. (2016)	Casca de arroz	39,5	23	14,5	18,35	-

FONTE: O autor (2017).

Pode-se observar que as quantidades de celulose, hemicelulose e lignina para a casca de arroz se aproximam dos valores apresentados em trabalhos mais atuais, como os de Silva (2013) e Silva et al. (2016). Porém, em estudo mais antigo, Houston (1972), os valores de celulose e lignina, para a casca de arroz, foram superiores aos encontrados neste trabalho. Isso pode ter ocorrido devido ao fato de que na década de 1970 não se extraía o teor de cinzas das substâncias (celulose, hemicelulose e lignina). Por essa mesma razão, os valores de celulose (C) e lignina (L), apresentados na Tabela 4 para CA (81,43%) celulose e lignina com cinzas, são próximos aos de Houston (1972), com 80%.

A lignina nos materiais lignocelulósicos fortalece e enrijece a parede celular da fibra, mantém as células unidas e ainda protege os tecidos vegetais da degradação química e/ou biológica (CANILHA et al., 2010; MARABEZI et al., 2009). Nos compósitos, uma maior porcentagem de lignina pode ajudar no enrijecimento, fortalecimento e união das partículas

dos elementos estruturais (CE e CA), fazendo com que melhorem algumas de suas propriedades finais.

4.1.4 Caracterização granulométrica – distribuição por tamanho das partículas de CE e CA

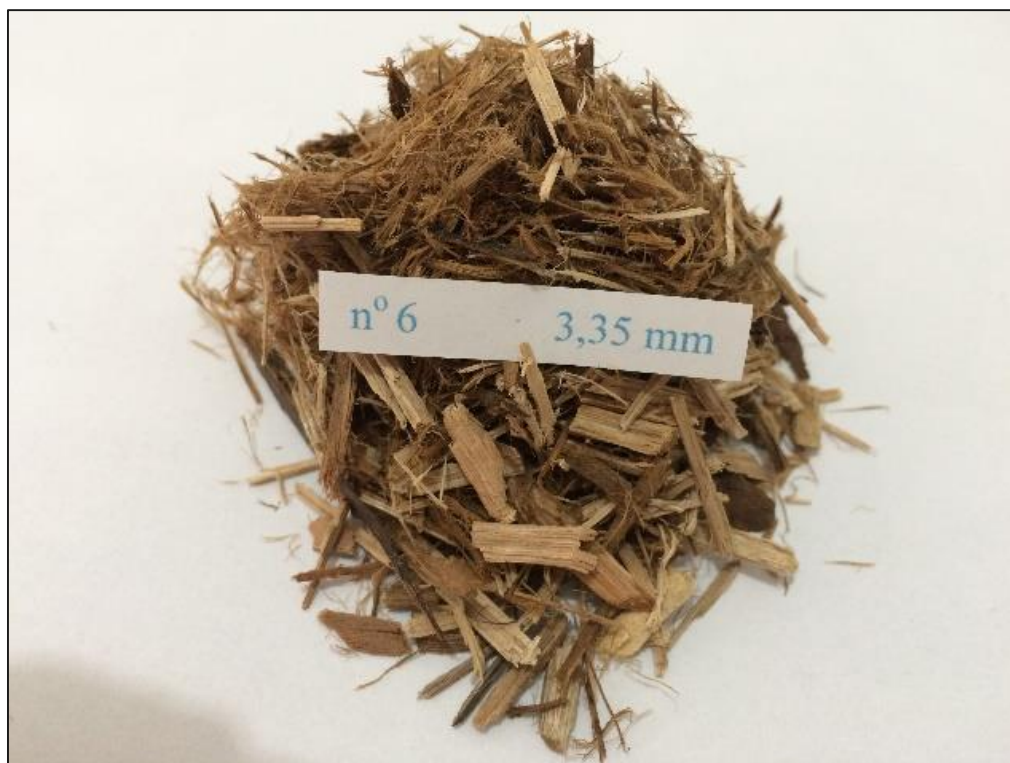
Nos resultados obtidos com as partículas das cascas de eucalipto (Tabela 6) verificou-se que a dimensão máxima das partículas desses resíduos (Figuras 28 a 38), de acordo com a NBR 7217/87, é de 3,35 mm (peneira nº 6) e o módulo de finura de 7,41.

TABELA 6 - DISTRIBUIÇÃO POR TAMANHO DAS PARTÍCULAS DE CASCAS DE EUCALIPTO (CE)

Peneira nº	µm	Porcentagem		
		Retida	Retida acumulada	Que passa na peneira
06	3350	4,10	4,10	95,90
10	2000	10,60	14,70	85,30
18	1000	35,40	50,10	49,90
20	850	5,50	55,60	44,40
35	500	17,10	72,70	27,30
40	425	6,40	79,10	20,90
60	250	7,90	87	13
70	212	2,10	89,10	10,90
120	125	4,70	93,80	6,20
140	105	1,30	95,10	4,90
Fundo	-----	4,90	100	-----

FONTE: O autor (2017).

FIGURA 28 - CASCA DE EUCALIPTO COM 3,35 MM



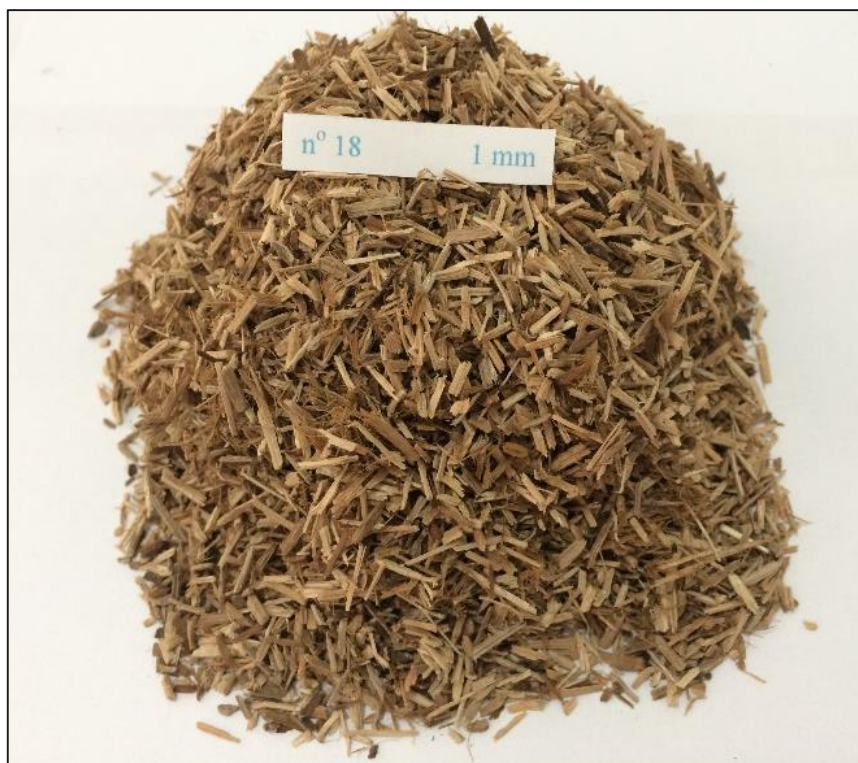
FONTE: O autor (2017).

FIGURA 29 - CASCA DE EUCALIPTO COM 2 MM



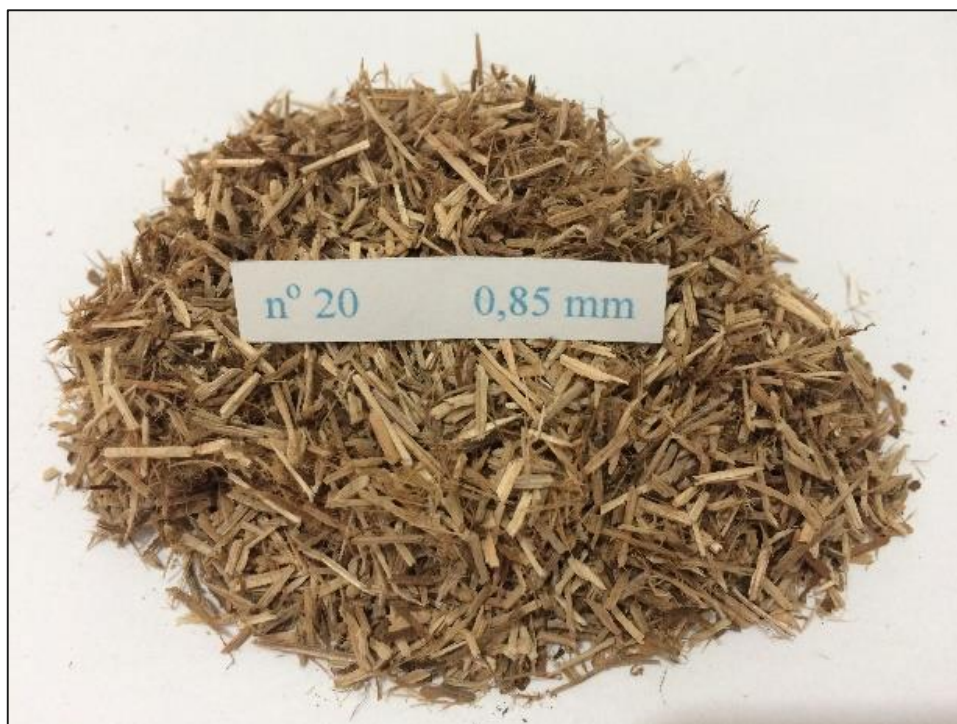
FONTE: O autor (2017).

FIGURA 30 - CASCA DE EUCALIPTO COM 1 MM



FONTE: O autor (2017).

FIGURA 31 - CASCA DE EUCALIPTO COM 0,85 MM



FONTE: O autor (2017).

FIGURA 32 - CASCA DE EUCALIPTO COM 0,5 MM



FONTE: O autor (2017).

FIGURA 33 - CASCA DE EUCALIPTO COM 0,425 MM



FONTE: O autor (2017).

FIGURA 34 - CASCA DE EUCALIPTO COM 0,250 MM



FONTE: O autor (2017)

FIGURA 35 - CASCA DE EUCALIPTO COM 0,212 MM



FONTE: O autor (2017).

FIGURA 36 - CASCA DE EUCALIPTO 0,125 MM



FONTE: O autor (2017).

FIGURA 37 - CASCA DE EUCALIPTO COM 0,105 MM



FONTE: O autor (2017).

FIGURA 38 - CASCA DE EUCALIPTO DE FUNDO DE PENEIRA



FONTE: O autor (2017).

Nos resultados obtidos com as partículas das cascas de arroz (Tabela 7) verificou-se que a dimensão máxima das partículas desses resíduos (Figuras 39 a 49), de acordo com a NBR 7217/87, é de 3,35 mm (peneira nº 6) com módulo de finura de 8,62.

TABELA 7 - DISTRIBUIÇÃO POR TAMANHO DAS PARTÍCULAS DE CASCAS DE ARROZ (CA)

nº	Peneira µm	Porcentagem		
		Retida	Retida acumulada	Que passa na peneira
nº 06	3350	0,10	0,10	99,90
nº 10	2000	6,40	6,50	93,50
nº 18	1000	73,30	79,80	20,20
nº 20	850	6,40	86,20	13,80
nº 35	500	9,30	95,50	4,50
nº 40	425	1,80	97,30	2,70
nº 60	250	1,30	98,60	1,40
nº 70	212	0,30	98,90	1,10
nº 120	125	0,40	99,30	0,70
nº 140	105	0,10	99,40	0,60
Fundo	-----	0,60	100	-----

FONTE: O autor (2017).

FIGURA 39 - CASCA DE ARROZ COM 3,35 MM



FONTE: O autor (2017).

FIGURA 40 - CASCA DE ARROZ COM 2 MM



FONTE: O autor (2017).

FIGURA 41 - CASCA DE ARROZ COM 1 MM



FONTE: O autor (2017).

FIGURA 42 - CASCA DE ARROZ COM 0,85 MM



FONTE: O autor (2017).

FIGURA 43 - CASCA DE ARROZ COM 0,5 MM



FONTE: O autor (2017).

FIGURA 44 - CASCA DE ARROZ COM 0,425



FONTE: O autor (2017).

FIGURA 45 - CASCA DE ARROZ COM 0,250 MM



FONTE: O autor (2017).

FIGURA 46 - CASCA DE ARROZ COM 0,212 MM



FONTE: O autor (2017).

FIGURA 47 - CASCA DE ARROZ COM 0,125 MM



FONTE: O autor (2017).

FIGURA 48 - CASCA DE ARROZ COM 0,105 MM



FONTE: O autor (2017).

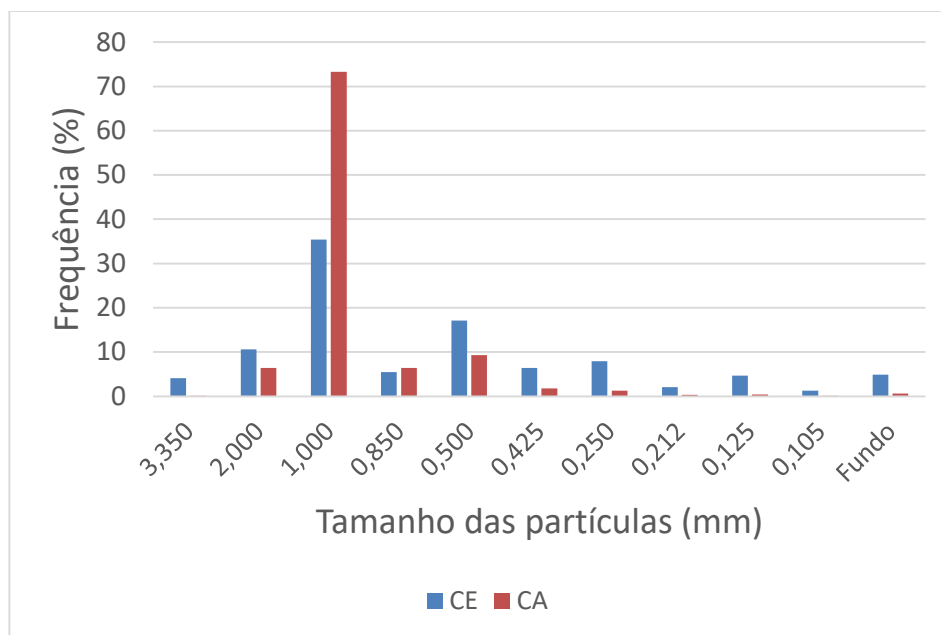
FIGURA 49 - CASCA DE ARROZ DE FUNDO DE PENEIRA



FONTE: O autor (2017).

A análise granulométrica dos dois tipos de cascas, CE e CA, mostra que a distribuição do tamanho das partículas varia de um para outro. A Figura 50 apresenta a frequência, em porcentagem, de cada tamanho de partícula para cada tipo de casca utilizada.

FIGURA 50 - FREQUÊNCIA DA DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA DO TAMANHO DAS PARTÍCULAS DE CE E DE CA



FONTE: O autor (2017).

Verifica-se que a casca de arroz apresenta maior frequência de partículas maiores, acima de 1 mm. De acordo com a Tabela 7, essa frequência é de aproximadamente 80%, enquanto que a de casca de eucalipto é de 50% (Tabela 6).

A homogeneidade do tamanho das partículas de CE é maior em relação às partículas de CA. Observa-se na Figura 50 que as partículas de CE apresentaram frequência acima de 20% para as granulometrias de 0,425 a 0,125, já para CA a frequência foi abaixo de 4%.

4.2 ENSAIO DE MORFOLOGIA DAS PARTÍCULAS

O ensaio de morfologia dos compósitos fornece uma melhor compreensão do comportamento interno desse tipo de material, considerando, na respectiva análise, homogeneização das misturas, interação fibra/matriz, agregado de fibras, ausência de fibras na matriz, arrancamento de fibras da matriz (*pull-out*) e presença de vazios, como forma de obter respostas para os resultados dos ensaios mecânicos.

Nas Figuras 51 a 64 são apresentadas algumas micrografias internas, feitas com um microscópio estéreo, com aumento de 50 vezes, da fratura de amostras dos compósitos processados em extrusora dupla rosca e em misturador termocinético Drais e moldados por injeção.

Nessas figuras utilizam-se as seguintes marcações para ressaltar defeitos visíveis:

- Seta branca – fibras não dispersas – agregado de fibras;
- Seta azul – matriz sem reforço;
- Círculo branco – vazios;
- Círculo vermelho – arrancamento de fibras (*pull-out*).

Pode-se verificar que, em todos os tratamentos, com exceção do Tratamento 2 (Figura 51), os compósitos não apresentaram boa homogeneidade nas misturas (ausência de reforço na matriz e/ou presença de agregados de fibras que não se dispersaram) e apresentaram baixa interação entre fibra/matriz (presença de *pull-out* e/ou fibras expostas não encobertas pela matriz). Segundo Bledzki e Gassan (1999) e Bledzki et al. (2008), as fibras celulósicas devem ser secas e tratadas para que atinjam um grau de adesão aceitável com a matriz, alcançando assim seu pleno potencial de reforço.

A secagem das fibras é necessária para evitar a influência negativa da presença de umidade em sua interface com os diferentes constituintes. Mohanty et al. (2001) também afirmam que tratamentos das fibras, tais como desengraxamento, grafitação, branqueamento, acetilação ou reação com álcalis, peróxidos, silanos ou isocianatos, são essenciais para a obtenção de materiais com melhores desempenhos. Kalaprasad et al. (2004) citam ainda anidrido acético, ácido estereárico, permanganato e anidrido maleico para aumento da adesão entre fibra e matriz.

Neste trabalho foi feita a secagem das fibras, porém o fato de não terem passado por nenhum tratamento químico, o que poderia ter aumentado sua interação com a matriz, pode ter influenciado nos compósitos.

Em alguns compósitos houve a formação de agregados de fibras, que não se dispersaram (Figuras 55, 57 e 58 – setas brancas), sendo esse efeito evidenciado nos tratamentos com maior teor de fibras (30% de CE e de CA). Esse efeito foi observado em ambos os processos, extrusora dupla rosca e Drais. Comparando a dispersão da casca de eucalipto na matriz com a da casca de arroz, nos compósitos com 10% e 20% de reforço, confeccionados em extrusora dupla rosca (Figuras 51 e 53) e na Drais (Figuras 52 e 54), verifica-se que não ocorreu formação de agregados de fibras. Nota-se também, nas Figuras 52 e 54, que não é possível observar a presença de reforço em partes da matriz (setas azuis), consequência da baixa homogeneização nas misturas.

Em todos os tratamentos com reforço, CE ou CA (Tratamentos 2, 3, 4, 5, 6, 7, 9 e 10 – Figuras 51, 53, 55, 52, 54, 56, 57 e 58, respectivamente), foram observados vazios (bolhas de ar), uns com menor e outros com maior intensidade. De acordo com Chambers et al. (2006), Grunenfelder e Nutt (2010), Lambert et al. (2012), Zhang et al. (2011) e Schmidt et al. (2012), as propriedades mecânicas, em especial a resistência ao cisalhamento e a resistência à flexão, são muito comprometidas pela presença de vazios.

Neste trabalho o que provavelmente provocou a presença de vazios nos compósitos foi a adição de fibras, pois os tratamentos sem reforço (100% BOPP – Figuras 59 e 60) não apresentaram vazios. Segundo Costa, Almeida e Rezende (2001) e Liu et al. (2006), a formação de vazios em compósitos deve-se, em geral, à presença de bolhas de ar aprisionadas entre os feixes do reforço fibroso, à umidade absorvida pelo reforço durante a sua armazenagem e a parâmetros de processos inadequados, como tempo, pressão e temperatura e/ou provenientes da resina, quando de sua existência.

Sabe-se que a fibra é higroscópica, absorve umidade, e, quanto maior a absorção de umidade pelas fibras, maior a probabilidade do aparecimento de vazios. A CA possui em sua composição porcentagem alta de sílica (SiO_2), de 15% a 20%. A sílica é inorgânica e não absorve umidade. Sendo assim, supõe-se que as amostras com CE apresentaram maior absorção de umidade e conseqüentemente maior porcentagem de vazios.

Além disso, Lopes (2014) constatou, em trabalho com compósitos de fibra com polímero, que o tamanho das fibras é um fator limitante, pois foi evidenciada uma drástica redução de vazios em compósitos de fibras com granulometrias maiores; isso se confirmou neste trabalho, que revelou menor quantidade de vazios em compósitos utilizando como reforço as cascas de arroz (CA). Como mostra a Tabela 7, as granulometrias de CA maiores que 1 mm foram de aproximadamente 80%, já a Tabela 6 mostra que as cascas de eucalipto (CE) com granulometria acima de 1 mm apresentaram 30% a menos que a CA. Angrizani et al. (2006), em estudo com compósitos de sisal com poliéster, constataram uma tendência de haver quantidade inferior de vazios em compósitos de fibras com granulometrias maiores. O maior teor de vazios pode levar à maior absorção de umidade dos compósitos, pois esses vazios facilitam a entrada da umidade para seu interior, alojando-se nas interfaces fibra/matriz, diminuindo assim sua resistência.

4.2.1 Ensaio de morfologia – avaliação em função do tipo de reforço incorporado (CE ou CA)

De acordo com a Figura 51, em compósitos processados na extrusora e moldados por injeção com a inclusão de 10% de CE na matriz (Figura 51), houve boa homogeneização na mistura do compósito, boa dispersão das fibras na matriz, além de interação entre fibra/matriz; como consequência, observa-se que as fibras estão encobertas pela matriz. Observa-se, contudo, a ocorrência de muitos vazios (círculos brancos) em praticamente toda a imagem.

Já com a inclusão de 10% de CA na matriz (Figura 52), houve baixa homogeneização na mistura do compósito, sendo possível observar espaços sem a presença de reforço em partes da matriz (setas azuis); baixa interação fibra/matriz, com fibras expostas não encobertas pela matriz, e *pull-out* (círculo vermelho). Há também quantidade razoável de vazios (círculos brancos).

FIGURA 51 - 90% MATRIZ + 10% REFORÇO (CE). PROCESSO: EXTRUSORA + INJETORA.
TRATAMENTO 2: BOPP 90 + CE 10



FONTE: O autor (2017).

FIGURA 52 - 90% MATRIZ + 10% REFORÇO (CA). PROCESSO: EXTRUSORA + INJETORA.
TRATAMENTO 5: BOPP 90 + CA 10



FONTE: O autor (2017).

Tomando como referência a Figuras 51 e 52, é possível afirmar que a amostra com 10% de CE apresentou melhor homogeneidade na mistura e melhor interação fibra/matriz em relação à amostra com 10% de CA. Esse fato pode ser atribuído às propriedades de cada um desses materiais, às características morfológicas das cascas, a porcentagens diferentes de partículas maiores e menores (Tabelas 6 e 7), a diferentes densidades e a outras características inerentes ao tipo de casca (HILLIG et al., 2006).

Com relação *pull-out* provavelmente foi causado pela baixa interação entre fibra e matriz, fenômeno já discutido e reportado, no item 4.2, com base em Bledzki e Gassan (1999), Mohanty et al. (2001), Kalaprasad et al. (2004) e Bledzki et al. (2008). Para que as fibras apresentem aceitável grau de adesão com a matriz, é preciso, em muitos casos, que sejam tratadas antes de ser processadas, o que não ocorreu neste programa experimental.

A amostra com 10% de CA apresentou menor quantidade de vazios em relação à amostra com 10% de CE. Sabe-se que a fibra é higroscópica, absorve umidade e, quanto maior a absorção de umidade pelas fibras, maior a probabilidade do aparecimento de vazios. A CA possui em sua composição porcentagem alta de sílica (SiO_2), de 15% a 20%. A sílica é inorgânica e não absorve umidade. Sendo assim, supõe-se que as amostras com CE apresentaram maior absorção de umidade e conseqüentemente maior porcentagem de vazios.

Além disso, é possível supor que granulometrias maiores influenciem na diminuição dos vazios (Figuras 51 e 52), como foi discutido no item 4.2 pelos autores Lopes (2014) e Angrizani et al. (2006), que constataram uma tendência de haver menor quantidade de vazios em compósitos de fibras com granulometrias maiores, e como aponta esta pesquisa, que observou maior intensidade de vazios em compósitos com CA, que possuem em sua composição granulométrica (Tabela 7) porcentagem mais elevada de partículas maiores que 1 mm (80%) em relação aos compósitos com casca de eucalipto (50%).

De acordo com a Figuras 53 e 54, em compósitos processados na extrusora e moldados por injeção com a inclusão de 20% de CE na matriz (Figura 53), houve baixa homogeneização na mistura do compósito e também baixa interação fibra/matriz; como consequência, observam-se fibras expostas não encobertas pela matriz. Há também quantidade razoável de vazios (círculos brancos).

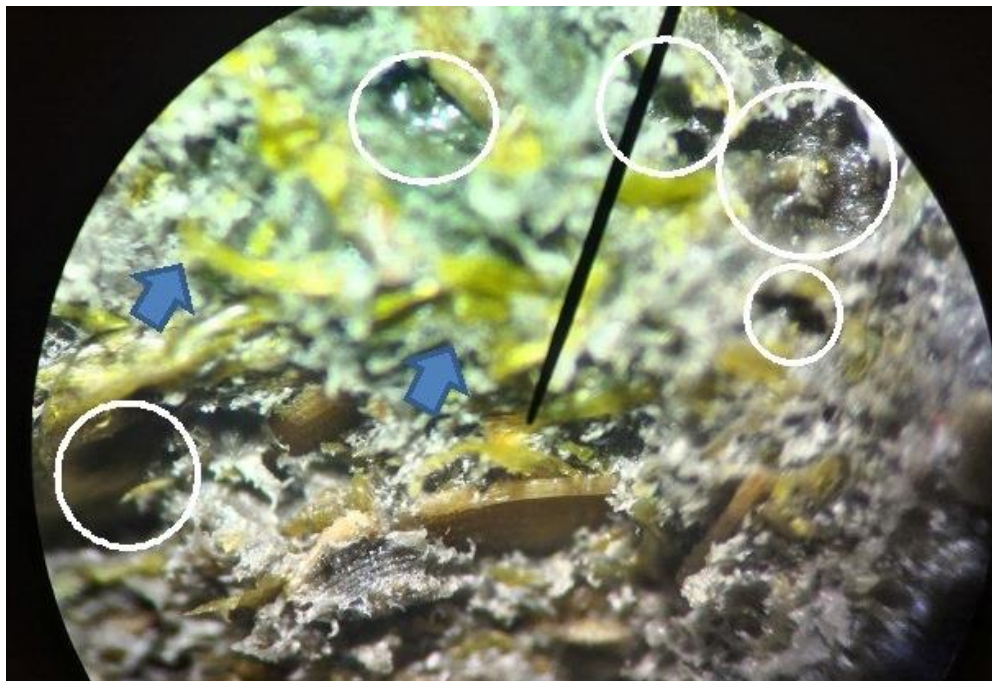
Já com a inclusão de 20% de CA na matriz (Figura 54), houve baixa homogeneização na mistura do compósito; como consequência, observam-se espaços sem a presença de reforço em partes da matriz (setas azuis) e baixa interação fibra/matriz; em decorrência disso, observam-se fibras expostas não encobertas pela matriz. Há também quantidade razoável de vazios (círculos brancos).

FIGURA 53 - 80% MATRIZ + 20% REFORÇO (CE). PROCESSO: EXTRUSORA + INJETORA.
TRATAMENTO 3: BOPP 80 + CE 20



FONTE: O autor (2017).

FIGURA 54 - 80% MATRIZ + 20% REFORÇO (CA). PROCESSO: EXTRUSORA + INJETORA.
TRATAMENTO 6: BOPP 80 + CA 20



FONTE: O autor (2017).

O tratamento com incorporação de 20% de CE (Figura 53) apresentou resultados de morfologia diferentes dos apresentados pelo tratamento com incorporação de 20% de CA (Figura 54). A amostra com CE apresentou maior quantidade de vazios em relação à amostra com reforço de CA, mas nenhuma delas apresentou boa homogeneidade nas misturas. Como consequência, a amostra com CE apresentou maior exposição das fibras sem a presença de matriz, em relação à amostra com CA; foi observada, em partes da amostra, a ausência de reforço na matriz (setas azuis), causada pela baixa homogeneização na mistura.

Sendo assim, tomando como referência a Figuras 53 e 54, é possível afirmar que a amostra com 20% de CE apresentou, em algumas partes, melhor homogeneidade na mistura, em relação à amostra com 20% de CA. Porém, esta última apresentou melhor interação fibra/matriz em relação à amostra com 20% de CE. O que motivou esses acontecimentos já foi descrito anteriormente, no item 4.2, pelos autores Bledzki e Gassan (1999), Mohanty et al. (2001), Kalaprasad et al. (2004) e Bledzki et al. (2008). De acordo com Hillig et al. (2006), esse fato também pode ser atribuído às propriedades de cada um desses materiais, às características morfológicas das partículas das cascas, a porcentagens diferentes de partículas maiores e menores (Tabelas 6 e 7), a diferentes densidades e a outras características inerentes ao tipo de casca.

A amostra com 20% de CA apresentou menor quantidade de vazios em relação à amostra com 20% de CE. Sabe-se que a fibra é higroscópica, absorve umidade e, quanto maior a absorção de umidade pelas fibras, maior a probabilidade do aparecimento de vazios. A CA possui em sua composição porcentagem alta de sílica (SiO_2), de 15% a 20%. A sílica é inorgânica e não absorve umidade. Sendo assim, supõe-se que as amostras com CE apresentaram maior absorção de umidade e conseqüentemente maior porcentagem de vazios.

Além disso, foi possível supor que granulometrias maiores influenciem na diminuição dos vazios (Figuras 53 e 54), como já foi discutido, no item 4.2, pelos autores Lopes (2014) e Agrizani et al. (2006), que constataram uma tendência de haver quantidade inferior de vazios em compósitos de fibras com granulometrias maiores.

De acordo com a Figuras 55 e 56, houve baixa homogeneização na mistura dos compósitos processados na extrusora e moldados por injeção com a inclusão de 30% de CE na matriz (Figura 55). Como consequência observa-se a concentração de agregados de fibras que não se dispersaram (seta branca) e baixa interação fibra/matriz; em decorrência disso, observam-se fibras expostas não encobertas pela matriz e *pull-out* (círculos vermelhos). Há também quantidade razoável de vazios (círculos brancos).

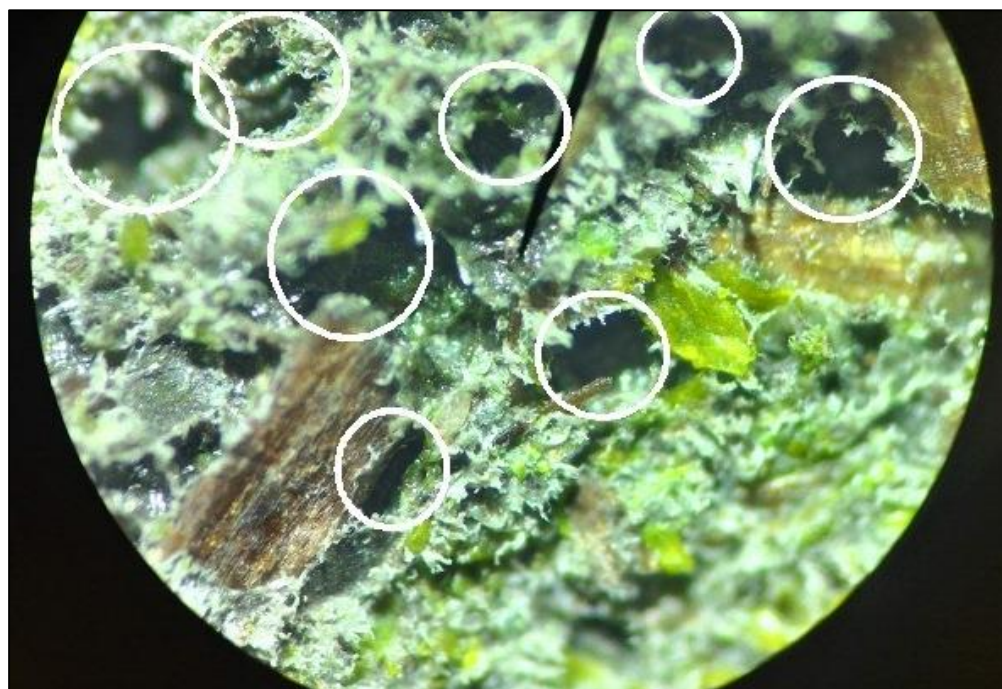
Já com a inclusão de 30% de CA na matriz (Figura 56), houve baixa homogeneização na mistura do compósito e também baixa interação fibra/matriz. Como consequência, observam-se fibras expostas não encobertas pela matriz. Há também alta quantidade de vazios (círculos brancos).

FIGURA 55 - 70% MATRIZ + 30% REFORÇO (CE). PROCESSO: EXTRUSORA + INJETORA.
TRATAMENTO 4: BOPP 70 + CE 30



FONTE: O autor (2017).

FIGURA 56 - 70% MATRIZ + 30% REFORÇO (CA). PROCESSO: EXTRUSORA + INJETORA.
TRABAMENTO 7: BOPP 70 + CA 30



FONTE: O autor (2017).

O tratamento com incorporação de 30% de CE (Figura 55) apresentou resultados de morfologia diferentes dos apresentados pelo tratamento com incorporação de 30% de CA (Figura 56). Porém, a amostra com CA apresentou maior quantidade de vazios em relação à amostra com reforço de CE. Já a amostra com CE apresentou *pull-out* (círculos vermelhos) e agregado de fibras que não se dispersaram (seta branca), o que não ocorreu na amostra com CA.

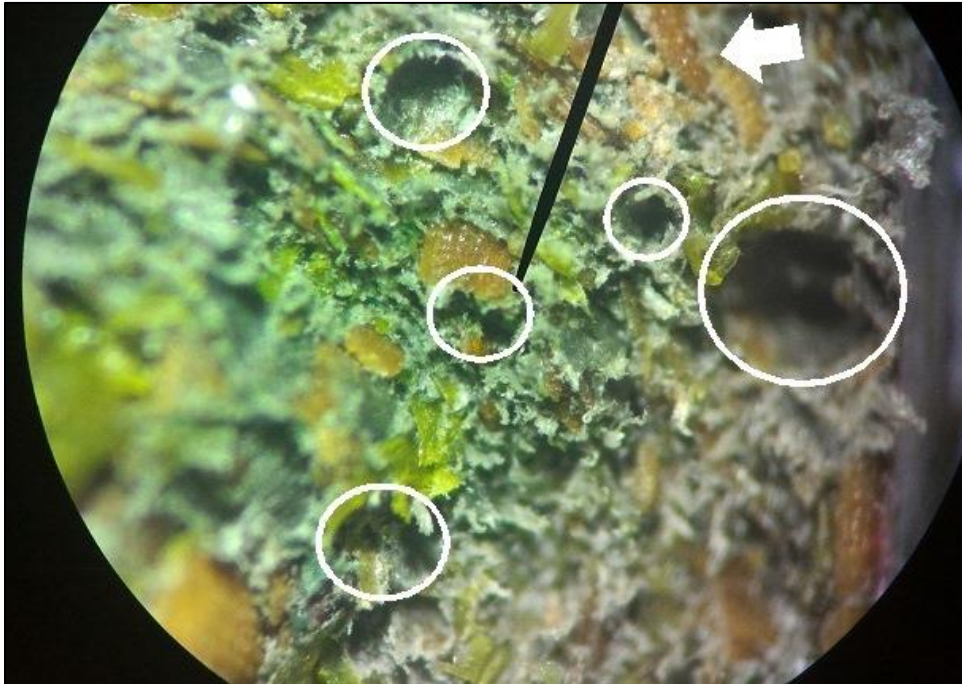
Sendo assim, tomando como referência a Figuras 55 e 56, foi possível concluir que nenhuma das duas amostras apresentou boa homogeneidade na mistura ou boa interação fibra/matriz. A amostra com 30% de CA apresentou maior quantidade de vazios em relação à amostra com 30% de CE. Porém, a amostra com 30% de CE apresentou *pull-out* causado pela baixa interação fibra/matriz, como já foi discutido no item 4.2 pelos autores Bledzki e Gassan (1999), Mohanty et al. (2001), Kalaprasad et al. (2004) e Bledzki et al. (2008). O agregado de fibras, causado pela baixa homogeneização na mistura, também foi constatado.

Não foi possível correlacionar a quantidade de vazios pois, com base no que foi discutido anteriormente, o esperado era que a amostra de 30% de CE apresentasse o maior percentual.

De acordo com a Figuras 57 e 58, houve baixa homogeneização na mistura dos compósitos processados na Drais e moldados por injeção com a inclusão de 30% de CE na matriz (Figura 57). Como consequência observa-se a concentração de agregados de fibras que não se dispersaram (seta branca) e também baixa interação fibra/matriz. Em decorrência disso, observam-se fibras expostas não encobertas pela matriz. Há também quantidade razoável de vazios (círculos brancos).

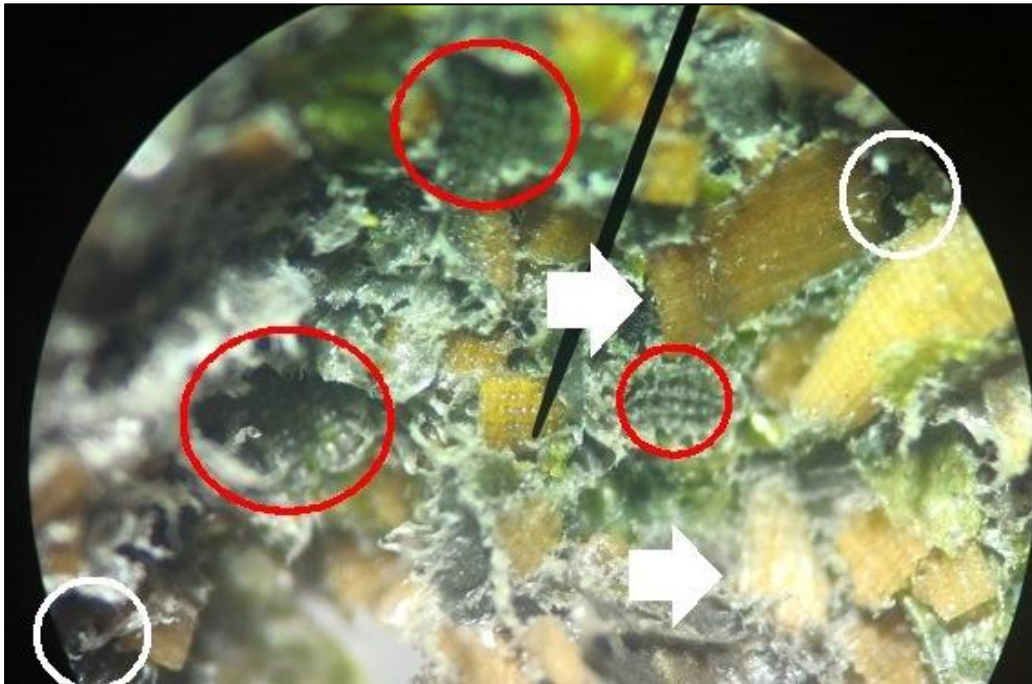
Já com a inclusão de 30% de CA na matriz (Figura 58), houve baixa homogeneização na mistura do compósito; como consequência, observa-se a concentração de agregados de fibras que não se dispersaram (setas brancas) e também baixa interação fibra/matriz. Como decorrência, observam-se fibras expostas não encobertas pela matriz e *pull-out* (círculos vermelhos). Há também pequena quantidade de vazios (círculos brancos).

FIGURA 57 - 70% MATRIZ + 30% REFORÇO. PROCESSO: MISTURADOR TERMOCINÉTICO DRAIS + INJETORA. TRATAMENTO 9: BOPP 70 + CE 30



FONTE: O autor (2017).

FIGURA 58 - 70% MATRIZ + 30% REFORÇO. PROCESSO: MISTURADOR TERMOCINÉTICO DRAIS + INJETORA. TRATAMENTO 10: BOPP 70 + CA 30



FONTE: O autor (2017).

O tratamento com incorporação de 30% de CE (Figura 57) apresentou resultados de morfologia diferentes dos apresentados pelo tratamento com incorporação de 30% de CA (Figura 58). A amostra com CE apresentou maior quantidade de vazios que a amostra com CA. Apesar de nenhuma das duas amostras da Figuras 57 e 58 ter apresentado boa homogeneização na mistura, a amostra com CA apresentou elementos que a amostra com CE não apresentou, como: *pull-out* (círculos vermelhos) e agregado de fibras que não se dispersaram (seta branca).

Sendo assim, tomando como referência a Figuras 57 e 58, foi possível concluir que a amostra com 30% de CE apresentou melhor homogeneidade na mistura e melhor interação fibra/matriz em relação à amostra com 30% de CA. Porém, esta última apresentou *pull-out*, causado pela baixa interação fibra/matriz. O agregado de fibras também foi constatado na amostra com 30% de CA, causado pela baixa homogeneização na mistura. O que motivou esses acontecimentos foi descrito no item 4.2, de acordo com Bledzki e Gassan (1999), Mohanty et al. (2001), Kalaprasad et al. (2004) e Bledzki et al. (2008). O mesmo fato pode ser atribuído às propriedades de cada um desses materiais, como aponta Hillig et al. (2006) também no item 4.2.

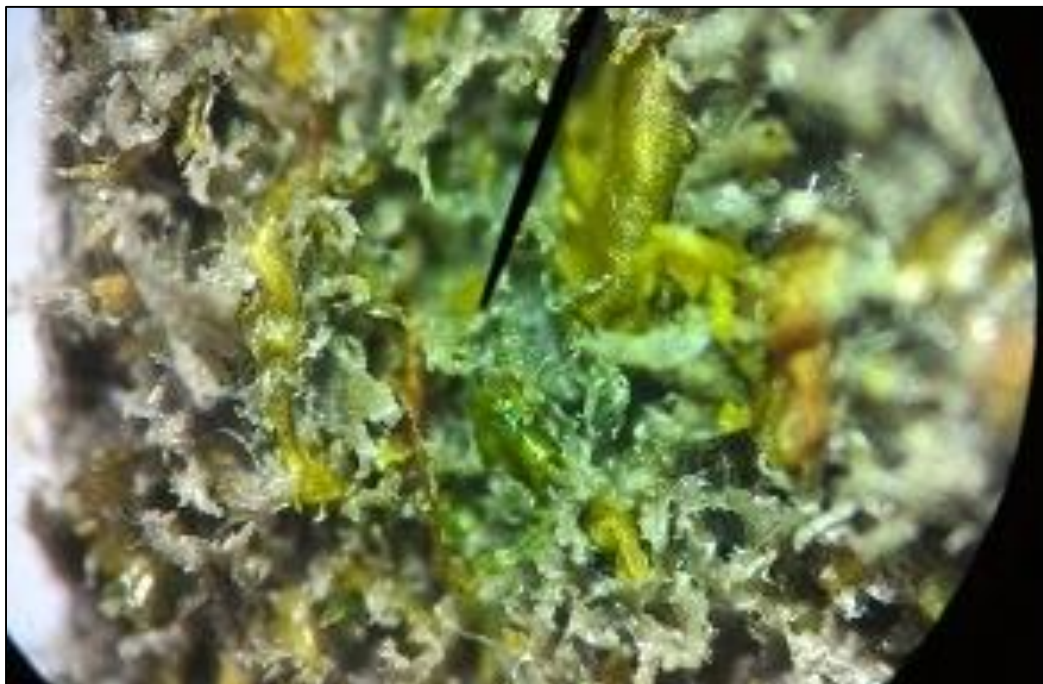
A amostra com 30% de CA apresentou menor quantidade de vazios em relação à amostra com 30% de CE. Sabe-se que a fibra é higroscópica, absorve umidade e, quanto maior a absorção de umidade pelas fibras, maior a probabilidade do aparecimento de vazios. A CA possui em sua composição porcentagem alta de sílica (SiO_2), de 15% a 20%. A sílica é inorgânica e não absorve umidade. Sendo assim, supõe-se que as amostras com CE apresentaram maior absorção de umidade e conseqüentemente maior porcentagem de vazios.

Além disso, foi possível supor que granulometrias maiores influenciam na diminuição dos vazios (Figuras 57 e 58), como já foi discutido no item 4.2 pelos autores Lopes (2014) e Angrizani et al. (2006), que constataram uma tendência de haver quantidade inferior de vazios em compósitos de fibras com granulometrias maiores.

4.2.2 Ensaio de morfologia – avaliação em função do processo produtivo utilizado

Observa-se que a matriz processada na Drais (Figura 60) apresentou melhor fusão do polímero em relação à matriz processada na extrusora (Figura 59). Isso aconteceu pelo fato de a Drais ser um misturador termocinético, utilizado especialmente para a homogeneização de materiais.

FIGURA 59 - MATRIZ SEM REFORÇO. TRATAMENTO 1: BOPP 100. PROCESSO: EXTRUSORA + INJETORA



FONTE: O autor (2017).

FIGURA 60 - MATRIZ SEM REFORÇO. TRATAMENTO 8: BOPP 100. PROCESSO: MISTURADOR TERMOCINÉTICO DRAIS + INJETORA



FONTE: O autor (2017).

Com a inclusão de 30% de CE na matriz (Figura 61), o material processado na extrusora + injetora apresentou baixa homogeneização na mistura do compósito; observa-se a concentração de agregados de fibras que não se dispersaram (seta branca) e também baixa interação fibra/matriz. Verificam-se fibras expostas não encobertas pela matriz e *pull-out* (círculos vermelhos). Há também quantidade razoável de vazios (círculos brancos).

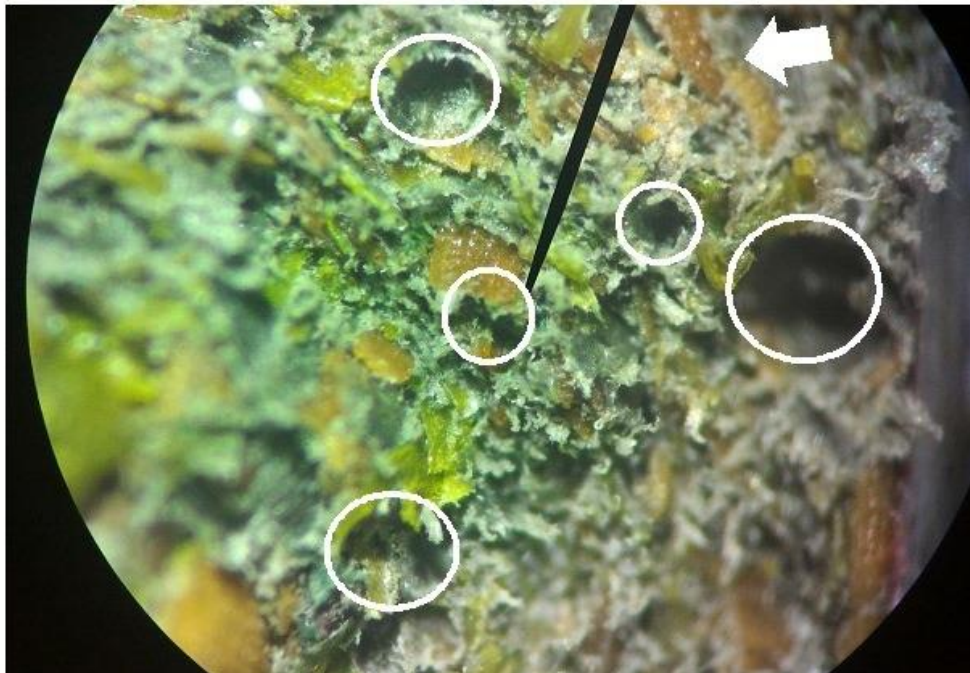
Já com a inclusão de 30% de CE na matriz (Figura 62), o material processado na Drais + injetora apresentou baixa homogeneização na mistura do compósito; como consequência, observa-se a concentração de agregados de fibras que não se dispersaram (seta branca) e também baixa interação fibra/matriz. Como consequência, verificam-se fibras expostas não encobertas pela matriz. Há também quantidade baixa de vazios (círculos brancos).

FIGURA 61 - 70% MATRIZ + 30% REFORÇO (CE). TRATAMENTO 4: BOPP 70 + CE 30. PROCESSO: EXTRUSORA + INJETORA



FONTE: O autor (2017).

FIGURA 62 - 70% MATRIZ + 30% REFORÇO (CE). TRATAMENTO 9: BOPP 70 + CE 30. PROCESSO: DRAIS + INJETORA



FONTE: O autor (2017).

O tratamento com incorporação de 30% de CE processado pela extrusora + injetora (Figura 61) apresentou resultados de morfologia praticamente iguais aos apresentados pelo tratamento com incorporação de 30% de CE processado pela Drais + injetora (Figura 62). A amostra com CE processada na Drais + injetora (Figura 62) não apresenta *pull-out* (círculos vermelhos), observado na amostra com CE processado na extrusora + injetora (Figura 62), e verifica-se menor quantidade de vazios na Drais em relação à extrusora.

Sendo assim, tomando como referência a Figuras 61 e 62, é possível afirmar que nenhuma das duas amostras apresentou boa homogeneidade na mistura; como consequência, observa-se a concentração de agregados de fibras que não se dispersaram (setas brancas), mas, pelo fato de a amostra processada na Drais + injetora não apresentar *pull-out*, pode-se concluir que houve melhor interação fibra/matriz em relação ao material processado na extrusora + injetora. Portanto, com relação à utilização de CE, o processo de mistura com a Drais ofereceu melhores resultados de homogeneização na mistura e interação fibra/matriz.

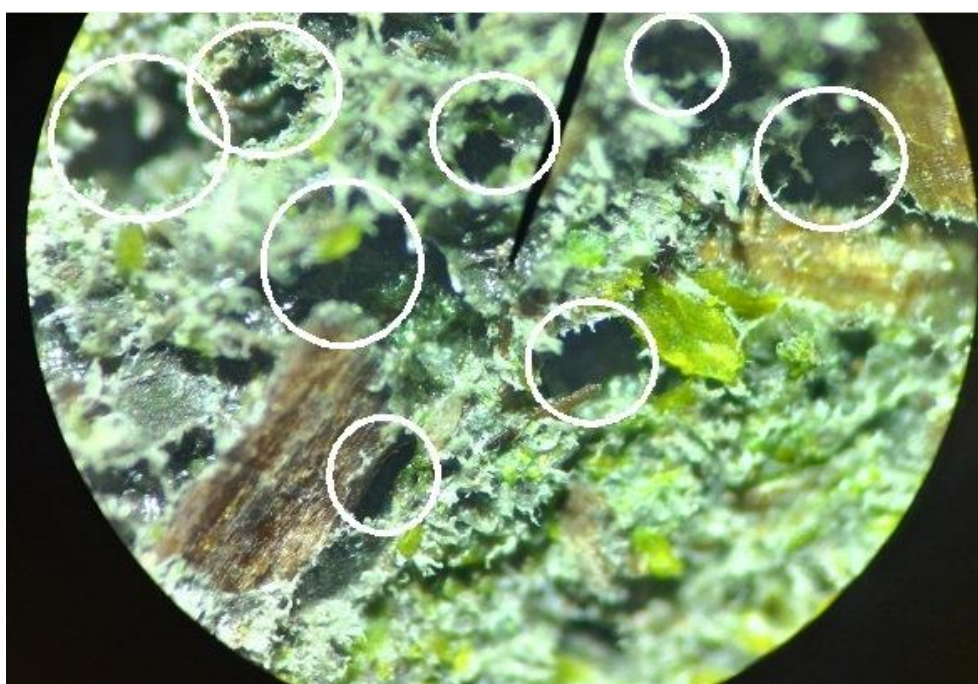
O compósito produzido na Drais apresentou menor quantidade de vazios em relação ao produzido na extrusora. O motivo pelo qual isso ocorreu já foi descrito no item 4.2, segundo Costa, Almeida e Rezende (2001) e Liu et al. (2006). Pode-se supor que a presença de vazios em maior quantidade observada na extrusora tenha sido causada pelo fato de a

bomba de vácuo do equipamento não estar funcionando no momento da produção dos materiais compósitos. Essa bomba é responsável pela retirada de umidade e gases voláteis, processo conhecido como degasagem. Apesar de as cascas de eucalipto e de arroz estarem com aproximadamente 2% de umidade antes do processamento na extrusora, essa umidade deve ter aumentado enquanto se preparavam as misturas e se esperava o equipamento esquentar para o início da produção. A não utilização da bomba de vácuo causou aumento dos vazios (bolhas de ar), que costumam surgir quando as partículas com umidade são aquecidas e se expandem.

Com a inclusão de 30% de CA na matriz (Figura 63), o material processado na extrusora + injetora apresentou baixa homogeneização na mistura do compósito e também baixa interação fibra/matriz. Como consequência, observam-se fibras expostas não encobertas pela matriz. Há também alta quantidade de vazios (círculos brancos).

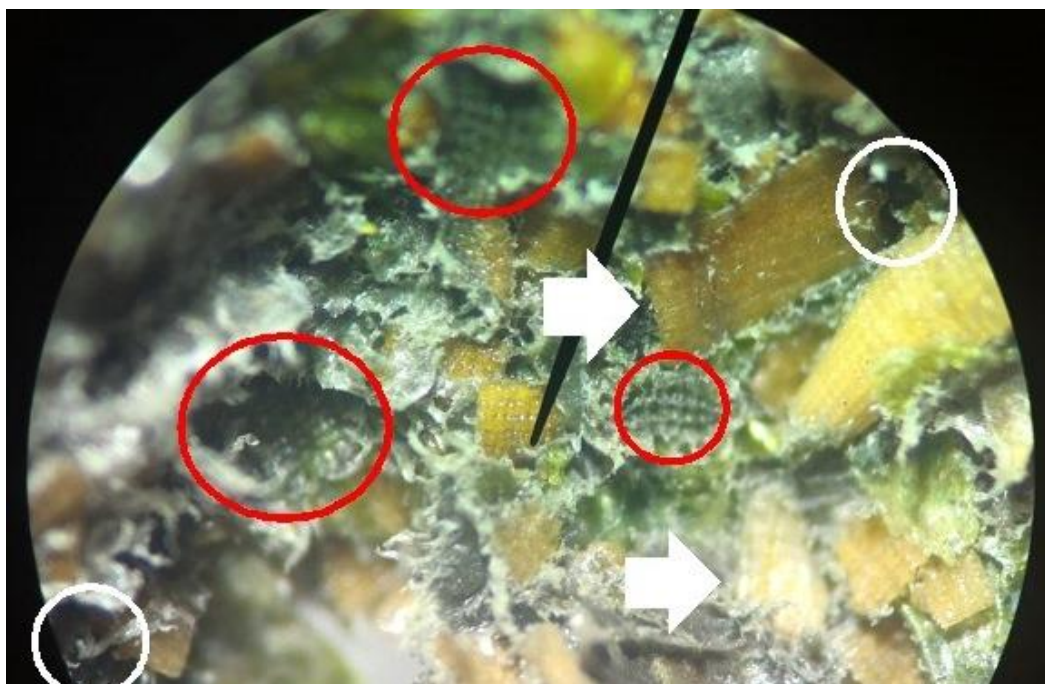
Já com a inclusão de 30% de CA na matriz (Figura 64), o material processado na Drais + injetora apresentou baixa homogeneização na mistura do compósito; como consequência, observa-se a concentração de agregados de fibras que não se dispersaram (setas brancas) e também baixa interação fibra/matriz; em decorrência disso, observam-se fibras expostas não encobertas pela matriz e *pull-out* (círculos vermelhos). Há também pequena quantidade de vazios (círculos brancos).

FIGURA 63 - 70% MATRIZ + 30% REFORÇO (CA). TRATAMENTO 7: BOPP 70 + CA 30. PROCESSO: EXTRUSORA + INJETORA



FONTE: O autor (2017).

FIGURA 64 - 70% MATRIZ + 30% REFORÇO (CA). TRATAMENTO 10: BOPP 70 + CA 30. PROCESSO: DRAIS + INJETORA



FONTE: O autor (2017).

O tratamento com incorporação de 30% de CA processado na extrusora + injetora (Figura 63) apresentou resultados de morfologia diferentes dos apresentados pelo tratamento com incorporação de 30% de CA processado na Drais + injetora (Figura 64). A amostra com CA produzida na extrusora + injetora apresentou maior quantidade de vazios em relação à amostra com CA produzida na Drais + injetora. Porém, nenhuma delas apresentou boa homogeneidade nas misturas. Das duas amostras, apenas a da Drais + injetora apresentou elementos como *pull-out* (círculos vermelhos) e agregado de fibras que não se dispersaram (setas brancas).

Sendo assim, tomando como referência a Figuras 63 e 64, é possível concluir que o compósito processado na extrusora + injetora apresentou melhor homogeneização da mistura e melhor interação fibra/matriz em relação ao processado na Drais + injetora. Portanto, com relação à utilização de CA, o processo de mistura utilizando extrusora apresentou melhores resultados de homogeneização e de interação fibra/matriz. Assim como, na Figuras 61 e 62, o compósito processado na extrusora + injetora apresentou quantidade superior de vazios, em relação ao processado na Drais + injetora. O motivo pelo qual isso ocorreu já foi descrito no item 4.2, segundo Costa, Almeida e Rezende (2001) e Liu et al. (2006). Pode-se supor também que a presença de vazios em maior quantidade observada na extrusora foi causada pelo fato de a bomba de vácuo do equipamento, responsável pelo processo de degasagem, não

estar funcionando no momento da produção dos materiais compósitos. Apesar de as cascas de eucalipto e de arroz estarem com aproximadamente 2% de umidade antes do processamento na extrusora, essa umidade deve ter aumentado enquanto se preparavam as misturas e enquanto se esperava o equipamento esquentar para o início da produção. A não utilização da bomba de vácuo causou aumento dos vazios, que costumam surgir quando as partículas com umidade são aquecidas e se expandem.

4.3 CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DOS COMPÓSITOS – DENSIDADE

Na Tabela 8 são apresentados os valores médios de densidade, que variaram de 1,03 g/cm³ a 1,27 g/cm³.

TABELA 8 - VALORES MÉDIOS DE DENSIDADE

Equip.	Tratamentos	Cod.	Densidade (g/cm³)
Extrusora + injetora	BOPP 100	1	1,07 (1,87%) e
	BOPP 90 + CE 10	2	1,12 (2,68%) d
	BOPP 80 + CE 20	3	1,18 (2,54%) c
	BOPP 70 + CE 30	4	1,19 (1,68%) c
	BOPP 90 + CA 10	5	1,17 (1,71%) c
	BOPP 80 + CA 20	6	1,13 (2,65%) d
	BOPP 70 + CA 30	7	1,22 (1,64%) b
Drais + injetora	BOPP 100	8	1,03 (3,88%) e
	BOPP 70 + CE 30	9	1,24 (0,80%) b
	BOPP 70 + CA 30	10	1,27 (1,57%) a

FONTE: O autor (2017).

NOTA: Os valores seguidos de mesma letra não apresentam diferença estatística, com nível de significância de 5%. Entre parênteses se encontram os valores de coeficiente de variância (C.V.).

Nos tratamentos da matriz sem reforço (BOPP 100) observa-se menor densidade em relação aos tratamentos da matriz com reforços. De maneira geral, tanto na extrusora como na Drais, a CE apresentou menores valores de densidade em relação à CA. Sendo assim, houve influência do tipo de processo utilizado, sendo que os compósitos produzidos na Drais + injetora apresentaram densidades mais altas que as dos compósitos produzidos na extrusora + injetora.

A proporção de cascas (CE ou CA) foi a variável de maior influência sobre a densidade dos compósitos, tendo correlação positiva para a CE e não havendo tendência evidente para a CA.

Já as densidades mais baixas foram observadas nos tratamentos com ausência de reforço (BOPP 100), nos dois processos, que não apresentaram diferença significativa entre si. A influência da adição de fibras à matriz sem reforço também foi verificada em outros estudos, como os de Youngquist (1999) e Stark (1999), ambos trabalhando com polipropileno, e os de Yam et al. (1990) e Fonseca (2005), que trabalharam com misturas de PEAD (polietileno de alta densidade) reciclado e madeira. Em todos os casos, verifica-se que a fibra causa um aumento da densidade dos compósitos em relação ao polímero sem fibra. Yimsamerjit et al. (2007) trabalharam com compósitos de sabugo de milho com acetato de amido e observaram que o aumento do teor de reforço elevou os valores de densidade dos compósitos. Assim como os estudos citados, este trabalho apresenta densidades maiores com a adição de reforço em relação à matriz sem reforço, o que é natural, já que a densidade do BOPP foi inferior à das cascas de eucalipto e de arroz e a densidade da casca de eucalipto foi inferior à da casca de arroz (Tabela 2).

Os efeitos observados nas interações “tipo de casca *versus* processo” foram marcantes, mostrando que os dois tipos de processos usados causaram diferentes efeitos na densidade dos compósitos confeccionados com os dois tipos de cascas. Os compósitos com adição de 30% de reforço (CE ou CA) produzidos na extrusora + injetora apresentaram densidades mais baixas em relação aos produzidos na Drais + injetora. Compósitos com adição de CE produzidos na extrusora + injetora diferenciaram-se significativamente dos compósitos com adição de CE produzidos na Drais + injetora e dos compósitos com CA.

4.4 CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA DOS COMPÓSITOS

4.4.1 Resistência à tração

Na Tabela 9 são apresentados os valores médios de tração. Esses valores variaram de 5,31 MPa a 7,29 MPa.

TABELA 9 - VALORES MÉDIOS DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO

Equip.	Tratamentos	Cod.	Resistência à tração (MPa)
Extrusora + injetora	BOPP 100	1	6,55 (3,78%) e
	BOPP 90 + CE 10	2	6,73 (3,24%) cd
	BOPP 80 + CE 20	3	7,13 (5,43%) ab
	BOPP 70 + CE 30	4	7,29 (2,25%) a
	BOPP 90 + CA 10	5	6,64 (8,68%) d
	BOPP 80 + CA 20	6	6,99 (5,28%) b
	BOPP 70 + CA 30	7	6,69 (4,49%) d
Drais + injetora	BOPP 100	8	5,31 (8,89%) f
	BOPP 70 + CE 30	9	6,96 (6,15%) bc
	BOPP 70 + CA 30	10	6,83 (7,98%) cd

FONTE: O autor (2017).

NOTA: Os valores seguidos de mesma letra não apresentam diferença estatística, com nível de significância de 5%. Entre parênteses se encontram os valores de coeficiente de variância (C.V.).

Os Tratamentos 4 (BOPP 70 + CE 30) e 3 (BOPP 80 + CE 20), nessa ordem, ambos produzidos nos equipamentos extrusora + injetora, apresentaram os maiores valores de tração, não apresentando diferença significativa entre si.

Com exceção do Tratamento 3 (BOPP 80 + CE 20), o Tratamento 4 (BOPP 70 + CE 30) diferenciou-se significativamente de todos os tratamentos. O Tratamento 3, considerado o segundo melhor resultado, não apresentou diferença significativa com relação aos Tratamentos 4 (BOPP 70 + CE 30), 6 (BOPP 80 + CA 20) e 9 (BOPP 70 + CE 30); e o Tratamento 9 não apresentou diferença significativa com relação aos Tratamentos 10 (BOPP 70 + CA 30), 2 (BOPP 90 + CE 10), 3 (BOPP 80 + CE 20) e 6 (BOPP 80 + CA 20), nessa ordem.

Nota-se que os piores resultados para tração foram os dos tratamentos com 100% BOPP (Tratamentos 1 e 8).

Azevedo et al. (2016) observaram um moderado aumento da resistência à tração, em relação à matriz polimérica Ecobrás pura, conforme aumentaram a porcentagem de fibra de casca de arroz. Bayer e Riegel (2009) estudaram materiais compósitos de PP com casca de arroz e também chegaram ao resultado de tração semelhante ao deste trabalho. Foi observado que os resultados dos materiais compósitos foram melhores em relação ao PP puro.

É possível afirmar que as fibras (CE e CA) levaram os materiais compósitos a apresentar melhores resultados que a matriz sem reforço (BOPP 100). As fibras possuem

maior resistência à tração que a matriz sem reforço e quando aderidas a ela aumentam a resistência do compósito.

Observa-se que com a adição de CE na matriz houve correlação positiva com o reforço. Com CA não se obteve o mesmo efeito, não havendo tendência evidente. De maneira geral, a CE apresentou melhores resultados em relação a CA.

De fato, observando-se os resultados do ensaio morfológico (Figuras 53 e 55), verifica-se melhor homogeneidade em partes das misturas dos compósitos com CE em relação aos demais tratamentos. O Tratamento 2 (10% de CE, produzido na extrusora), embora tivesse homogeneidade, apresentou vazios em praticamente toda a amostra (Figura 51).

A adesão fibra/matriz é determinada através de ensaios de *pull-out*. Fatores como tipo de fibra e diâmetro influenciam na adesão entre fibra e matriz (PEHANICH; BLANKENHORN; SILSBEE, 2004; MONTEIRO; ALMEIDA, 2006; BOSHOFF; MECHTCHERINE; ZIJL, 2009; HAMOUSH et al., 2010). Neste trabalho foi observado *pull-out* em compósitos com CE e com CA, com a mesma intensidade. Com relação à diferença entre os formatos das fibras é que CE possui estrutura mais alongada, de seção transversal arredondada, e CA possui formato mais retangular, de seção transversal achatada (ou quadrada). O módulo de finura, de acordo com as Tabelas 6 e 7, foi de 7,41 para CE e de 8,62 para CA. Isso significa que, quanto maior o módulo de finura, mais grossa a fibra. Por essas características estruturais, fibras como a CE aderem melhor à matriz do que as fibras como a CA.

Segundo Tramontin et al. (2002), compósitos com maior razão de aspecto apresentam menor homogeneidade em relação às de fibras mais curtas. Observa-se no ensaio de morfologia, pelas Figuras 51 a 58, que a CA possui maior razão de aspecto que a CE. Em concordância com o estudo de Tramontin, neste trabalho verificou-se que compósitos com CA apresentaram maior razão de aspecto e menor homogeneidade nas misturas em relação a compósitos com menor razão de aspecto (CE).

Observa-se que os tratamentos produzidos na extrusora apresentaram ligeira superioridade com CE em relação aos tratamentos produzidos na Drais. Já com relação à CA não houve diferença significativa entre os processos.

Observando os resultados do ensaio morfológico (Figuras 61 e 62), verifica-se melhor homogeneidade em partes das misturas do compósito produzido na extrusora em relação ao produzido na Drais.

Com relação aos tratamentos com CE produzidos na extrusora + injetora, a densidade teve efeito significativo, pois, conforme se aumenta o teor de fibra (CE), aumenta-se a

densidade e há elevação dos valores de resistência à tração. Com relação aos tratamentos com matriz sem reforço, produzidos tanto na extrusora como na Drais, a densidade teve efeito significativo, pois as menores densidades foram as que apresentaram menores valores de resistência à tração.

4.4.2 Resistência (MOR) e rigidez (MOE) à flexão

Na Tabela 10 são apresentados os valores de resistência à flexão (MOR) e módulo de elasticidade (MOE). Os valores médios de MOR variaram de 7,84 MPa a 12,50 MPa e os valores médios de MOE variaram de 801,75 MPa a 3634,75 MPa.

TABELA 10 - VALORES MÉDIOS DE FLEXÃO: TENSÃO NA FORÇA MÁXIMA (MOR) E MÓDULO DE ELASTICIDADE (MOE)

Equip.	Tratamentos	Cod.	Flexão MOR (MPa)	Flexão MOE (MPa)
Extrusora + injetora	BOPP 100	1	8,86 (2,70%) e	991 (9,11%) e
	BOPP 90 + CE 10	2	10,86 (10,58%) d	1415 (25,64%) d
	BOPP 80 + CE 20	3	11,06 (3,49%) cd	2050 (17,62%) c
	BOPP 70 + CE 30	4	11,65 (3,78%) bc	2506 (26,33%) c
	BOPP 90 + CA 10	5	11,98 (5,34%) ab	2303 (64,32%) c
	BOPP 80 + CA 20	6	11,32 (2,24%) c	1910 (7,77%) d
	BOPP 70 + CA 30	7	11,07 (13,88%) cd	2112 (12,14%) c
Drais + injetora	BOPP 100	8	7,84 (17,76%) f	802 (5,41%) e
	BOPP 70 + CE 30	9	11,71 (13%) bc	3635 (2,76%) a
	BOPP 70 + CA 30	10	12,50 (4,90%) a	3118 (13,08%) b

FONTE: O autor (2017).

NOTA: Os valores seguidos de mesma letra não apresentam diferença estatística, com nível de significância de 5%. Entre parênteses se encontram os valores de coeficiente de variância (C.V.).

Os Tratamentos 10 (BOPP 70 + CA 30) e 5 (BOPP 90 + CA 10), nessa ordem, produzidos nos equipamentos Drais + injetora e extrusora + injetora, respectivamente, apresentaram os maiores valores de MOR e não apresentaram diferença significativa entre si. A casca de arroz apresentou comportamento melhor que a casca de eucalipto como reforço na matriz. De acordo com Della, Kühn e Hotza (2001), a casca de arroz apresenta elevada dureza e fibrosidade.

Os piores resultados de MOR foram dos tratamentos com 100% BOPP (Tratamentos 1 e 8), repetindo situação já observada nos ensaios de tração. Da mesma forma, os piores tratamentos de MOR também foram considerados os piores tratamentos no ensaio de MOE.

As fibras fazem o papel de reforço no compósito e quando perfeitamente aderidas à matriz melhoram seu desempenho mecânico com esforços de tração e, em particular, na flexão (MOR).

Hillig et al. (2011) estudaram compósitos de polietileno de alta densidade (PEAD) com serragem de eucalipto e de pinus e concluíram, assim como neste trabalho, que os resultados de resistência à flexão (MOR) apresentaram crescimento com o aumento do teor de reforço com CE. A adição crescente de CA não apresentou resultado tão significativo, mas os melhores desempenhos ocorreram com a incorporação de reforço.

Os tratamentos com adição de CE produzidos na extrusora + injetora apresentaram melhora conforme se aumentou o teor de fibras. Já a adição de CA apresentou correlação negativa com o reforço, ou seja, com o aumento do teor de fibras os resultados diminuíram.

Os melhores resultados de MOR ocorreram com 10% de CA, produzido na extrusora, e com 30% de CA, produzido na Drais. Esses resultados podem ter sido condicionados pela qualidade das amostras produzidas. Segundo resultados do ensaio morfológico (Figura 52 – 10% de CA, produzido na extrusora; e Figura 58 – 30% de CA, produzido na Drais), é possível afirmar que essas amostras foram as que apresentaram a menor quantidade de vazios. Ambos os compósitos apresentaram *pull-out* mas, como mostram os resultados, esse elemento não foi um fator limitante na resistência à flexão.

Observa-se que os tratamentos produzidos na Drais apresentaram melhores resultados com CA em relação aos da extrusora. Já com relação a CE não houve diferença significativa entre os processos. De acordo com Della, Kühn e Hotza (2001), a casca de arroz apresenta elevada dureza e fibrosidade. Sendo assim, foi possível supor que a CE apresenta menor dureza e maior elasticidade em relação à CA.

Observando os resultados do ensaio morfológico (Figura 63 e Figura 64), verifica-se melhor homogeneidade em partes das misturas na amostra produzida na extrusora em relação à produzida na Drais. Porém, o tratamento produzido na extrusora apresentou quantidade bem superior de vazios em relação ao tratamento produzido na Drais; essa pode ter sido a causa de o pior tratamento ter ocorrido na extrusora e não na Drais, pois a presença de vazios em maior quantidade prejudicou os resultados MOR. Segundo Chambers et al. (2006), Grunenfelder e Nutt (2010), Lambert et al. (2012), Zhang et al. (2011) e Schmidt et al. (2012), as propriedades mecânicas dos compósitos são muito comprometidas pela presença de vazios.

Com relação aos tratamentos com CE produzidos na extrusora + injetora, a densidade teve efeito significativo, pois, conforme se aumenta o teor de fibra (CE), aumenta-se a densidade e há elevação dos valores de MOR. Com relação aos tratamentos produzidos na

Drais + injetora, com 30% de CE a densidade foi menor que com 30% de CA. Com matriz sem reforço (BOPP 100), produzida tanto na extrusora como na Drais, a densidade teve efeito significativo, pois as menores densidades foram as que apresentaram menores valores de MOR.

No MOE os tratamentos com adição de CE produzidos na extrusora + injetora apresentaram melhora conforme se aumentou o teor de fibra (CE). Já com a adição de CA não houve tendência evidente. De maneira geral os tratamentos com CE apresentaram ligeira superioridade em relação aos tratamentos com CA.

Os melhores resultados de MOE, iguais entre si, foram os dos Tratamentos 9 (BOPP 70 + CE 30) e 10 (BOPP 70 + CA 30), produzidos nos equipamentos Drais + injetora, demonstrando clara superioridade em relação aos produzidos na extrusora + injetora.

Os resultados do estudo morfológico observados nas Figuras 57 (30% de CE) e 58 (30% de CA), para compósitos produzidos na Drais, evidenciam menor quantidade de vazios nessas amostras. Novamente, verifica-se que a presença de vazios em maior quantidade prejudicou os resultados de MOE, sendo que o equipamento utilizado na produção dos compósitos foi um fator condicionante dos resultados. Outro compósito que apresentou menor quantidade de vazios foi o Tratamento 5, com 10% de CA, produzido na extrusora. Porém, esse tratamento, além de ter apresentado *pull-out* e ausência de reforço em partes da matriz, foi produzido na extrusora. Mesmo os Tratamentos 9 e 10, com 30% de CE e 30% de CA, respectivamente, apresentando baixa homogeneização das misturas, assim como os outros tratamentos, com exceção do Tratamento 2, apresentaram maior quantidade de vazios. Isso significa que, mesmo produzidos na Drais, com baixa homogeneização e baixa interação fibra/matriz, esses tratamentos apresentaram menor quantidade de vazios em relação aos produzidos na extrusora (Figuras 61 a 64). Pode-se afirmar que as propriedades de MOE foram afetadas negativamente pelos vazios. Segundo Chambers et al. (2006), Grunenfelder e Nutt (2010), Lambert et al. (2012), Zhang et al. (2011) e Schmidt et al. (2012), as propriedades mecânicas dos compósitos são muito comprometidas pela presença de vazios

Com relação aos tratamentos com CE produzidos na extrusora + injetora, a densidade teve efeito significativo, pois, conforme se aumenta o teor de fibra (CE), aumenta-se a densidade e há elevação dos valores de MOE. Com relação aos tratamentos com matriz sem reforço, produzidos tanto na extrusora como na Drais, a densidade teve efeito significativo, pois as menores densidades foram as que apresentaram menores valores de MOE.

4.4.3 Resistência ao impacto

Na Tabela 11 são apresentados os valores médios de resistência ao impacto, que variaram de 25,62 MPa a 78,29 MPa.

TABELA 11 - VALORES MÉDIOS DE RESISTÊNCIA AO IMPACTO

Equip.	Tratamentos	Cod.	Resistência ao impacto (MPa)
Extrusora + injetora	BOPP 100	1	78,29 (13,03%) a
	BOPP 90 + CE 10	2	34,12 (21,91%) f
	BOPP 80 + CE 20	3	40,56 (18,69%) d
	BOPP 70 + CE 30	4	25,95 (17,82%) e
	BOPP 90 + CA 10	5	51,06 (18,16%) c
	BOPP 80 + CA 20	6	53,44 (14,39%) c
	BOPP 70 + CA 30	7	39,40 (19,35%) d
Drais + injetora	BOPP 100	8	71,71 (11,41%) b
	BOPP 70 + CE 30	9	25,62 (25,80%) e
	BOPP 70 + CA 30	10	33 (51,17%) f

FONTE: O autor (2017).

NOTA: Os valores seguidos de mesma letra não apresentam diferença estatística, com nível de significância de 5%. Entre parênteses se encontram os valores de coeficiente de variância (C.V.).

Com base nos resultados apresentados na Tabela 11, nota-se que o Tratamento 1 (BOPP 100), produzido nos equipamentos extrusora + injetora, considerado o melhor tratamento, atingiu o maior valor de resistência ao impacto, considerado o melhor tratamento, apresentando diferença significativa com relação a todos os demais tratamentos. O Tratamento 8 (BOPP 100), produzido nos equipamentos Drais + injetora, foi considerado o segundo melhor tratamento. Além dos Tratamentos 1 e 8 apresentarem diferença significativa entre si, ambos obtiveram uma grande diferença estatística com relação aos demais. Foi possível observar que a resistência ao impacto (tenacidade) do BOPP sem reforço foi maior que a dos materiais compósitos.

O terceiro e quarto melhores resultados foram dos Tratamentos 6 (BOPP 80 + CA 20) e 5 (BOPP 90 + CA 10), respectivamente, ambos produzidos na extrusora + injetora. Tratamentos com adição de CA apresentaram melhores resultados em relação à adição de CE.

Nota-se que, quando se misturam fibras de CE e CA ao BOPP, há decréscimo nos resultados, sobretudo para adições maiores (30%). Azevedo et al. (2016) obtiveram resultados semelhantes aos encontrados neste trabalho, com significativo decréscimo da resistência ao

impacto com adição de fibra (casca de arroz), utilizando dois equipamentos em situações diferenciadas, a extrusora e o misturador interno. Bledzki (1999) afirma que o aumento do teor de “farinha” de madeira, em estudos diversos de matrizes poliméricas, causou uma diminuição significativa nas propriedades do ensaio de resistência ao impacto.

O Tratamento 9 (BOPP 70 + CE 30), produzido nos equipamentos Drais + injetora, e o Tratamento 4 (BOPP 70 + CE 30), produzido nos equipamentos extrusora + injetora, apresentaram os menores resultados e não demonstraram diferença significativa entre si, mas sim em relação aos demais tratamentos.

Observa-se que com a adição de CE e de CA na matriz não houve tendência clara e com 30% de reforço diminuiu o desempenho. A adição de CA apresentou um comportamento melhor que a de CE e, de certa forma, os tratamentos produzidos na extrusora + injetora com CA apresentaram melhores resultados que os produzidos nos equipamentos Drais + injetora. Segundo Sgriccia et al. (2008), a resistência ao impacto foi favorecida pela baixa adesão interfacial, uma vez que o processo pode absorver certa quantidade de energia. De acordo com a Tabela 11, os melhores resultados de resistência ao impacto foram observados nos compósitos com CA em relação aos compósitos com CE. De fato, o ensaio morfológico observado nas Figuras 51 a 58 demonstra que houve inferior homogeneidade e adesão entre fibra/matriz nos compósitos com CA em relação aos compósitos com CE.

A capacidade de um determinado material de absorver energia do impacto está ligada à sua tenacidade, que por sua vez está relacionada com a sua resistência e ductilidade. O ensaio de resistência ao impacto dá informações da capacidade do material de absorver e dissipar essa energia. Como resultado do ensaio de resistência ao impacto obtém-se a energia absorvida pelo material até sua fratura, caracterizando assim o comportamento dúctil-frágil. A matriz sem reforço (BOPP 100), tanto produzida na extrusora como na Drais, apresentou os melhores resultados. Sendo assim, de acordo com os resultados, o BOPP absorveu maior energia no ensaio de impacto. Pode-se afirmar que a tenacidade (impacto necessário para levar um material à ruptura) da matriz sem reforço foi maior que dos materiais compósitos. Sem a utilização de compatibilizantes ou aditivos anti-impacto foi ainda mais evidente a queda dos resultados de resistência ao impacto nos materiais compósitos em relação à matriz sem reforço.

4.4.4 Dureza Shore D

Na Tabela 12 são apresentados os valores médios de dureza Shore D, que variaram de 49,87 a 59,54.

TABELA 12 - VALORES MÉDIOS DE DUREZA SHORE D

Equip.	Tratamentos	Cod.	Dureza Shore D
Extrusora + injetora	BOPP 100	1	59,54 (4,10%) a
	BOPP 90 + CE 10	2	54,25 (3,19%) c
	BOPP 80 + CE 20	3	56,33 (5,37%) b
	BOPP 70 + CE 30	4	51,50 (10,46%) de
	BOPP 90 + CA 10	5	56,08 (5,96%) b
	BOPP 80 + CA 20	6	57,25 (4,22%) b
	BOPP 70 + CA 30	7	52,58 (3,27%) d
Drais + injetora	BOPP 100	8	59,05 (3,47%) a
	BOPP 70 + CE 30	9	49,87 (6,60%) e
	BOPP 70 + CA 30	10	50,75 (3,24%) e

FONTE: O autor (2017).

NOTA: Os valores seguidos de mesma letra não apresentam diferença estatística, com nível de significância de 5%. Entre parênteses se encontram os valores de coeficiente de variância (C.V.).

Com base nos resultados apresentados na Tabela 12, nota-se que o Tratamento 1 (BOPP 100), produzido nos equipamentos extrusora + injetora, considerado o melhor tratamento, atingiu o maior valor de dureza Shore D, não apresentando diferença significativa com relação ao Tratamento 8 (BOPP 100), produzido nos equipamentos Drais + injetora. Nota-se que, com adição de fibras de CE e CA ao BOPP, há decréscimo na dureza.

Os Tratamentos 9 (BOPP 70 + CE 30) e 10 (BOPP 70 + CA 30), ambos produzidos nos equipamentos Drais + injetora, apresentaram os menores resultados, sem diferença significativa entre si, mas demonstraram diferença significativa com relação aos demais tratamentos.

Os Tratamentos 4 (BOPP 70 + CE 30) e 7 (BOPP 70 + CA 30), ambos produzidos na extrusora + injetora, apresentaram o terceiro e quarto piores resultados, respectivamente. Assim, nota-se que os piores tratamentos ocorreram com a adição de 30% de fibras.

Observa-se que com a adição de CE e de CA na matriz não houve tendência clara e com 30% de reforço diminuiu o desempenho. A adição de CA gerou um comportamento ligeiramente superior em relação à adição de CE. De certa forma, os tratamentos produzidos

na extrusora + injetora com CA apresentaram ligeira superioridade nos resultados em relação aos produzidos nos equipamentos Drais + injetora.

Os tratamentos com maior teor de fibras (30%) apresentaram os piores resultados; os melhores foram observados em tratamentos com ausência de fibras (100% BOPP) e com menores porcentagens de fibras (10% e 20% de CE ou de CA).

Rosa (2007) encontrou, em compósitos de PP com casca de arroz, resultados semelhantes aos deste trabalho, mostrando que a adição de fibras influenciou no decréscimo dos valores de dureza Shore D.

Segundo Paiva e Frollini (1999), a dureza Shore D diminui conforme aumenta o conteúdo de fibra. Os autores explicam que as fibras vegetais são higroscópicas, portanto, conforme aumenta seu conteúdo, aumenta o teor de umidade do material. A presença de moléculas de água na superfície tem um efeito plastificante no exterior do material. Nesse sentido, como neste ensaio foi avaliada a dureza da superfície e não a do interior do material, os resultados obtidos não necessariamente estão indicando que a presença das fibras diminui a resistência mecânica à penetração de um corpo, mas pode estar relacionada ao maior potencial higroscópico do compósito.

De acordo com a explicação dos autores Paiva e Frollini (1999), o que pode ter influenciado nos piores resultados dos ensaios de dureza Shore D não foram os acréscimos de fibras, mas sim o aumento do teor de umidade do compósito proporcionado pelo aumento do teor de fibras.

Alguns autores, como Teixeira (2005), que estudou poliéster com “farinha” de madeira, Santos et al. (2006), que estudou PP com fibra de coco, e Muller et al. (2006), que estudaram PP com fibras de cana-de-açúcar, observaram que os resultados de dureza Shore D não apresentaram alterações significativas em relação ao percentual de fibras.

Ao contrário deste trabalho, Hillig et al. (2006) afirmaram que a adição de serragem ao PEAD ocasionou aumento dos valores de dureza. Hillig e seus colaboradores podem ter alcançado o encapsulamento das fibras encontradas na superfície dos compósitos, e isso fez com que elas não ficassem expostas à absorção de umidade. A utilização de resinas também pode ajudar a diminuir a absorção de umidade. Porém neste trabalho não foram utilizadas quaisquer resinas.

4.5 CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA – AVALIAÇÃO EM FUNÇÃO DO PROCESSO PRODUTIVO E DO TIPO DE REFORÇO

Na Tabela 13 são apresentadas as comparações entre os resultados produzidos nos equipamentos extrusora + injetora e Drais + injetora e entre os resíduos e a interação entre processo e resíduo em tratamentos com 30% de reforço com CE e CA e BOPP sem reforço.

Sendo:

Processo (P) = extrusora + injetora ou Drais + injetora;

Resíduo (R) = BOPP, CE e CA;

EPM = erro padrão médio.

TABELA 13 - ENSAIOS MECÂNICOS PARA AVALIAR O PROCESSAMENTO E A INSERÇÃO DE FIBRA (CE E CA) EM MATERIAIS COMPÓSITOS PRODUZIDOS COM BOPP

Ensaio mecânico	Extrusora + injetora			Drais + injetora			EPM	p valor		
	BOPP 100	BOPP 70 + CE 30	BOPP 70 + CA 30	BOPP 100	BOPP 70 + CE 30	BOPP 70 + CA 30		P	R	P * R
Tensão força máxima (MPa)	8,86 c	11,65 ab	11,07 b	7,83 c	11,71 a	12,50 a	0,52	0,1353	<,0001	0,0039
MOE (MPa)	991 d	2506 c	2112 c	802 d	3635 a	3118 b	211,09	<,0001	<,0001	0,0002
Tração (MPa)	6,55 a	7,29 a	6,69 a	5,31 b	6,96 a	6,83 a	0,53	0,4685	0,0113	0,0284
Impacto (J/m)	78,29 a	25,95 c	39,40 b	71,71 a	25,61 c	33,01 b	3,97	0,0581	<,0001	0,4347
Dureza	59,54 a	51,50 b	52,58 b	59,07 a	49,87 b	50,75 b	1,03	0,0537	<,0001	0,5967

FONTE: O autor (2017).

NOTA: Numa mesma linha, valores seguidos de mesma letra não apresentam diferença estatística, com nível de significância de 5%. Para p valor, valores menores que 5% ($P < 0,05$) apresentam diferença significativa e para P * R apresentam interação.

Na Tabela 13, os resultados de MOR apresentaram efeito significativo na interação entre processos e resíduos ($P = 0,0039$). Pode-se observar que o resultado do BOPP sem reforço produzido na extrusora + injetora foi melhor que o do BOPP sem reforço produzido na Drais + injetora, sem diferença significativa entre os processos. Assim, os materiais com

BOPP sem reforço podem ser produzidos em ambos os equipamentos sem diferença nos resultados do ensaio de MOR.

A adição de CE no BOPP apresentou melhora nos resultados quando se utilizaram os equipamentos Drais + injetora, porém não houve diferença significativa; em ambos os processos os resultados foram os mesmos. Com adição de CA, o melhor resultado foi observado nos equipamentos Drais + injetora e houve diferença significativa quando foram utilizados os equipamentos extrusora + injetora.

A adição de CE ou de CA melhorou os valores para essa característica, em comparação com os tratamentos produzidos exclusivamente com BOPP, em ambos os equipamentos. Os maiores valores, considerados os melhores resultados, foram os dos tratamentos com adição de CE produzidos em ambos os equipamentos e com adição de CA produzido na Drais + injetora.

Na Tabela 13, os resultados do ensaio de MOE apresentaram interação entre os processos e os resíduos testados ($P = 0,0002$). Pode-se observar que o resultado do BOPP sem reforço produzido na extrusora + injetora foi melhor que o do BOPP sem reforço produzido na Drais + injetora, sem diferença significativa entre os processos. Assim, os materiais produzidos com 100% BOPP podem ser utilizados em ambos os equipamentos sem que apresentem diferença significativa nos resultados dos ensaios de MOE.

A adição de CE ou de CA melhorou os valores desse ensaio em comparação com os tratamentos produzidos exclusivamente com BOPP sem reforço, em ambos os equipamentos.

Os resultados do ensaio de tração apresentaram interação entre os processos e os resíduos testados ($P = 0,0284$). Pode-se observar que o resultado do BOPP sem reforço produzido na extrusora + injetora foi melhor que o resultado do BOPP sem reforço produzido na Drais + injetora, com uma diferença significativa de 0,05 de probabilidade. A adição de CE no BOPP apresentou melhor resultado quando foram utilizados os equipamentos extrusora + injetora e sem diferença significativa entre os dois processos. Já a adição de CA no BOPP apresentou melhor resultado quando foram utilizados os equipamentos Drais + injetora e não houve diferença significativa quando utilizados os equipamentos extrusora + injetora.

A adição de CE melhorou os resultados desse ensaio em comparação com os tratamentos produzidos exclusivamente com BOPP, em ambos os equipamentos. Com adição de CA houve melhora nos resultados desse ensaio em relação aos tratamentos produzidos exclusivamente com BOPP sem reforço em ambos os equipamentos.

Na Tabela 13, os resultados do ensaio de resistência ao impacto não apresentaram interação entre os processos e os resíduos testados ($P = 0,4347$). A adição de CE ou de CA

apresentou decréscimo nos valores desse ensaio em comparação com os tratamentos produzidos exclusivamente com BOPP sem reforço, em ambos os equipamentos. A adição de CA no BOPP apresentou melhores resultados em comparação aos tratamentos produzidos com CE, em ambos os equipamentos, e verificou-se diferença significativa.

Os resultados do ensaio de dureza Shore D não apresentaram interação entre os processos e os resíduos testados ($P = 0,5967$). A adição de CE ou de CA apresentou decréscimo nos valores desse ensaio em relação aos tratamentos produzidos exclusivamente com BOPP sem reforço, em ambos os equipamentos, sem diferença significativa entre os processos. A adição de CA no BOPP apresentou melhores resultados em relação aos tratamentos produzidos com CE, em ambos os equipamentos, sem diferença significativa entre os processos.

4.6 CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA – AVALIAÇÃO EM FUNÇÃO DO TEOR DE REFORÇO INCORPORADO

As Tabelas 14 e 15 apresentam os resultados médios dos ensaios mecânicos para compósitos produzidos nos equipamentos extrusora + injetora (Tratamentos 1 a 7, Tabela 1) em função do teor de reforço incorporado (CE e CA, respectivamente).

Na combinação de BOPP com CE produzidos nos equipamentos extrusora + injetora (Tabela 14) houve efeito significativo em todos os níveis de tratamento. Porém foi utilizado comportamento linear ($P < 0,0001$) apenas nas avaliações de tensão na força máxima, MOE e tração. Nas avaliações de impacto e dureza, apesar de terem apresentado efeito linear significativo, o que determinou a utilização do efeito cúbico foi o maior coeficiente de determinação (R^2).

TABELA 14 - VALORES MÉDIOS DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS, EM FUNÇÃO DO NÍVEL DE PRESENÇA DE CE NOS MATERIAIS COMPÓSITOS

Ensaio de flexão	% de adição de CE				EPM	Contraste ² P-valor		
	0	10	20	30		Linear	Quadrática	Cúbica
Tensão força máxima (MPa)	8,86	10,86	11,06	11,65	0,23	<,0001	0,0065	0,0461
MOE (MPa)	991	1415	2049,88	2475,74	152,91	<,0001	0,9952	0,5311
Tração (MPa)	6,55	6,73	7,13	7,29	0,10	<,0001	0,8687	0,3371
Impacto (J/m)	78,29	34,13	40,56	25,95	2,16	<,0001	<,0001	<,0001
Dureza	59,54	54,25	56,33	51,50	1,19	0,0004	0,7796	0,0078

FONTE: O autor (2017).

NOTA: ² Contraste polinomial ortogonal foi usado para determinar o efeito linear, quadrático e cúbico.

Contudo, na utilização de BOPP associado a CA nos equipamentos extrusora + injetora (Tabela 15), verificaram-se tendências cúbicas para tensão na força máxima ($P = 0,0081$), MOE ($P < 0,0001$), impacto ($P = 0,0002$) e dureza ($P = 0,0026$). Para tração, apesar de não ter expressado nenhuma influência pelos tratamentos, foi utilizado o efeito quadrático.

TABELA 15 - VALORES MÉDIOS DOS ENSAIOS MECÂNICOS, EM FUNÇÃO DO NÍVEL DE PRESENÇA DE CA NOS MATERIAIS COMPÓSITOS

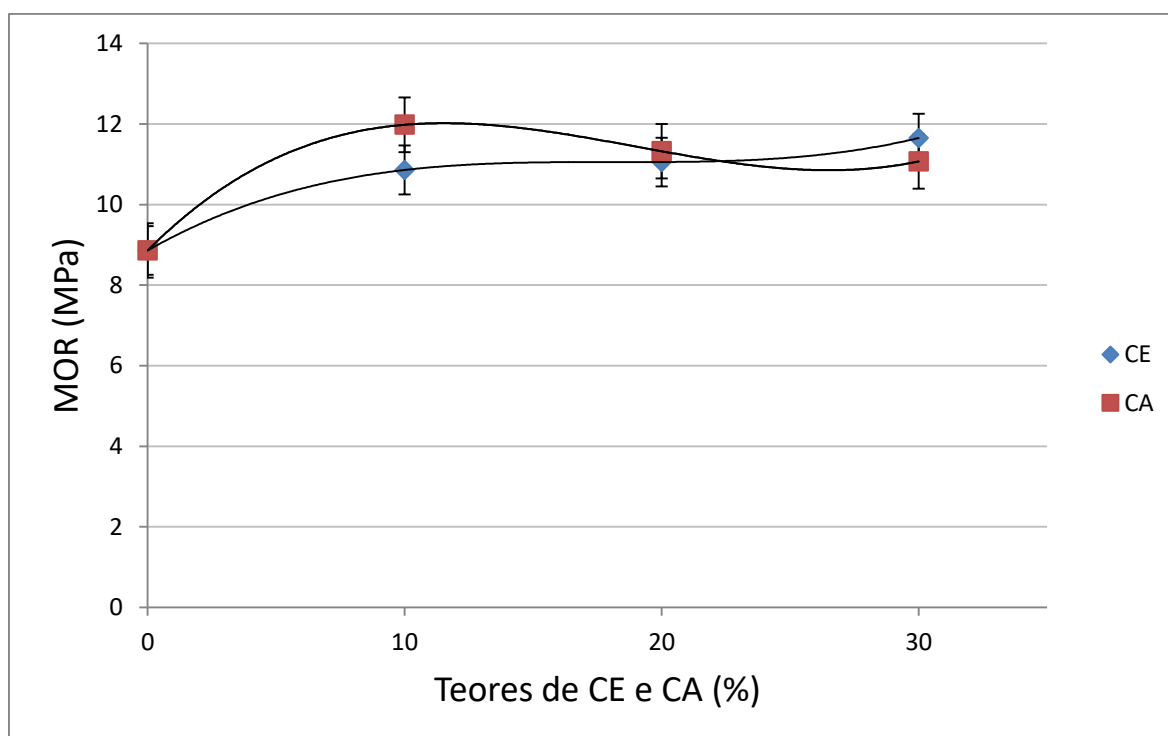
Ensaio de flexão	% de adição de CA				EPM	Contraste ² P-valor		
	0	10	20	30		Linear	Quadrática	Cúbica
MOR (MPa)	8,86	11,98	11,32	11,07	0,32	0,0004	<,0001	0,0081
MOE (MPa)	991	2956	1909,50	2040,72	293,64	0,0027	<,0001	<,0001
Tração (MPa)	6,55	6,68	7,02	6,69	0,17	0,3506	0,1870	0,2421
Impacto (J/m)	78,29	51,06	53,44	39,40	2,46	<,0001	0,0113	0,0002
Dureza	59,54	56,08	57,25	52,58	0,75	<,0001	0,4297	0,0026

FONTE: o autor (2017).

NOTA: ² Contraste polinomial ortogonal foi usado para determinar o efeito linear, quadrático e cúbico.

Observaram-se valores e tendências semelhantes no ensaio de MOR dos compósitos produzidos com CE e CA, pois com o acréscimo de fibras houve melhora nos resultados em relação ao BOPP sem reforço (Figura 65).

FIGURA 65 - GRÁFICO DOS RESULTADOS DO ENSAIO DE FLEXÃO – MÓDULO DE RUPTURA (MOR), EM FUNÇÃO DE NÍVEIS DE CE E DE CA NOS COMPÓSITOS



FONTE: O autor (2017).

As fibras são responsáveis por suportar cargas, fornecendo resistência ao compósito. Sendo assim, este trabalho apresentou resultados de resistência à flexão, de acordo com a literatura, indicando que as fibras incorporadas resultam na melhora da resistência à flexão dos materiais compósitos, em relação à matriz sem reforço. O aumento da resistência à flexão, com o aumento do teor de reforço, em compósitos de polímeros e fibras, foi verificado por diversos autores, como Rosa (2007), Hillig et al. (2011), Margem (2013) e Gomes et al. (2013), entre outros.

Caraschi et al. (2015), em estudo com compósitos de PP com capim-elefante, apresentaram resultados semelhantes a este trabalho, mostrando que menor resistência à flexão ocorreu com a matriz sem reforço; com 15% de reforço verificou-se melhora e com 25%, diminuição na resistência.

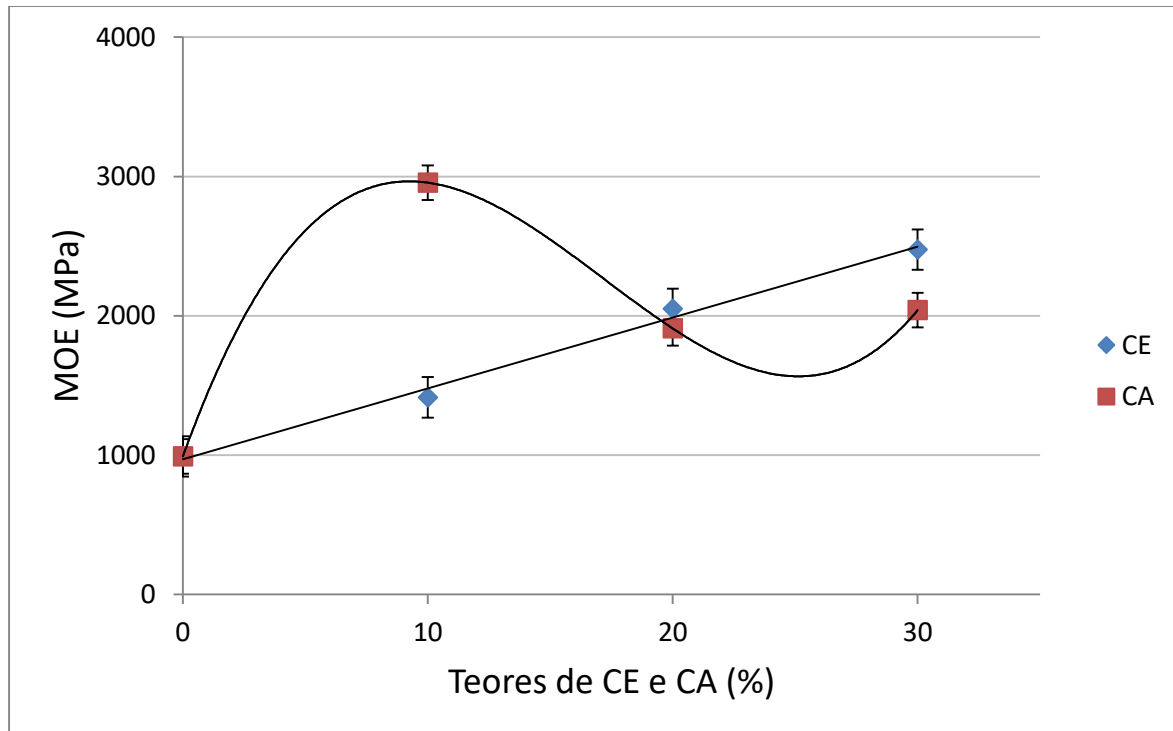
Ligowski et al. (2015), ao combinarem PEAD com 30% e 50% de bagaço de cana-de-açúcar, obtiveram compósitos extrudados com tensão na força máxima de 36 MPa e 45 MPa, respectivamente. Tais valores são superiores aos deste trabalho devido à natureza fibrosa do bagaço de cana-de-açúcar, que possibilita uma melhor disseminação da tensão, propiciando maior resistência à flexão.

Utilizando a combinação de polipropileno e teores de fibras naturais de licuri e curauá, Bispo (2011) conclui que, ao adicionar fibra de curauá ao polipropileno, o compósito extrudado apresentou melhores resultados em relação à matriz sem reforço.

De acordo com a Figura 65, é possível observar que os melhores resultados para 10% e 20% de reforço ocorreram com adição de CA, e para 30% de reforço com adição de CE. Segundo o ensaio morfológico observado nas Figuras 51 e 52 (10% de reforço), 53 a 54 (20% de reforço) e 55 e 56 (30% de reforço), é possível concluir que os melhores resultados estão relacionados à menor quantidade de vazios nos compósitos, ou seja, a presença de vazios influenciou nos piores resultados do ensaio de resistência à flexão. De acordo com Chambers et al. (2006), Grunenfelder e Nutt (2010), Lambert et al. (2012), Zhang et al. (2011) e Schmidt et al. (2012), as propriedades mecânicas dos compósitos são muito comprometidas pela presença de vazios.

De acordo com a Figura 66, a adição de CE e de CA melhorou os valores de MOE, em relação ao BOPP sem reforço. A adição de 10% de CA apresentou resultado bem acima daquele com adição de 10% de CE. Com 20% e 30% de reforço, os valores de CE foram superiores aos de CA. Observa-se que houve melhora nos resultados conforme se aumentou o teor de CE no compósito.

FIGURA 66 - GRÁFICO DOS RESULTADOS DO ENSAIO DE FLEXÃO – MÓDULO DE ELASTICIDADE (MOE), EM FUNÇÃO DE NÍVEIS DE CE E DE CA NOS COMPÓSITOS



FONTE: O autor (2017).

Os resultados de MOE estão de acordo com a literatura, que mostra que as fibras incorporadas resultam na melhora da rigidez dos materiais compósitos, em relação à matriz sem reforço. Isso se deve ao fato de que a carga fibrosa é mais rígida do que a matriz polimérica e impede sua livre mobilidade, evitando a deformação e aumentando assim o módulo de elasticidade com o aumento do teor de fibra.

O aumento de MOE com o aumento do teor de reforço, em compósitos de polímeros e fibras, foi verificado por diversos autores, como Santos et al. (2006), Rosa (2007), Gomes et al. (2013) e Ramos (2013), entre outros.

Caraschi et al. (2015), em estudo com compósitos de PP com capim-elefante, também encontraram resultados semelhantes aos deste trabalho, mostrando que menor módulo de elasticidade ocorreu com a matriz sem reforço; com 15% de reforço verificou-se melhora e com 25% o resultado foi superior àquele com 15% de reforço.

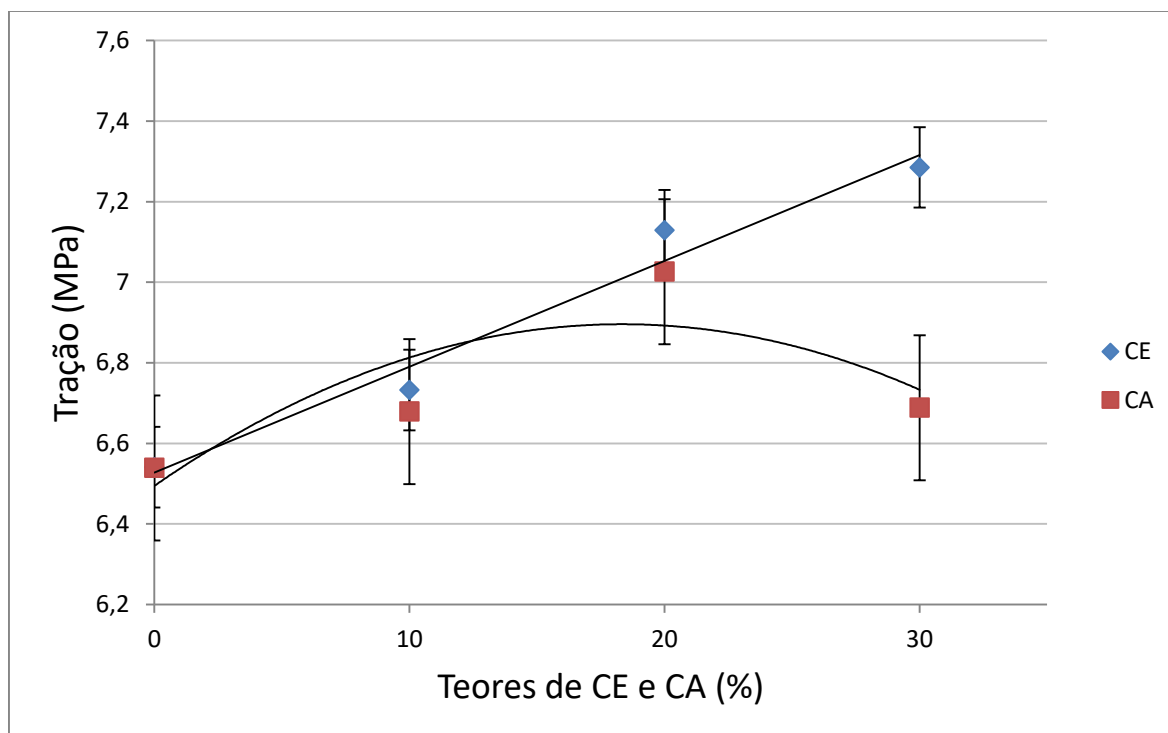
Hillig et al. (2011) estudaram compósitos com polietileno de alta densidade, utilizando como reforços serragem de eucalipto e de pinus. Os autores encontraram resultados semelhantes aos deste trabalho, mostrando que o menor módulo de elasticidade foi observado na matriz sem reforço e que o resultado melhorou com o acréscimo de fibras.

De acordo com a Figura 66, é possível observar que os melhores resultados de compósitos com 10% de reforço ocorreram com adição de CA, e com 20% e 30% de reforço ocorreram com adição de CE. Fazendo uma observação detalhada, é possível verificar na Figura 51 (10% de CE) que a quantidade de vazios foi muito superior em relação à Figura 52 (10% de CA). De acordo com a Figura 66, a amostra com 10% de CA apresentou melhores resultados que a amostra com 10% de CE. Na Figura 54 (20% de CA) e na Figura 53 (20% de CE) é possível observar que ambas as amostras apresentaram quantidade razoável de vazios e, de acordo com a Figura 66, não se verifica diferença significativa entre as amostras com 20% de CA e com 20% de CE. Observa-se que na amostra com 30% de CA (Figura 56) a quantidade de vazios é superior à da amostra com 30% de CE (Figura 55). De acordo com a Figura 66, a amostra com 30% de CE apresentou melhores resultados que a amostra com 30% de CA. Sendo assim, é possível concluir que o aumento de vazios provoca perda das propriedades mecânicas de MOE. De acordo com Chambers et al. (2006), Grunfelder e Nutt (2010), Lambert et al. (2012), Zhang et al. (2011) e Schmidt et al. (2012), as propriedades mecânicas dos compósitos são muito comprometidas pela presença de vazios.

Mesmo com o ensaio morfológico, observando a Figuras 51 e 52 (com 10% de reforço) não é possível entender o que provocou o elevado aumento no resultado com teor de 10% de CA.

De acordo com a Figura 67, nos tratamentos com CE a variável resistência à tração apresentou efeito significativo, o que permite inferir que a capacidade intrínseca de CE, quanto à resistência à tração, seja superior à de CA.

FIGURA 67 - GRÁFICO DOS RESULTADOS DO ENSAIO DE TRAÇÃO, EM FUNÇÃO DE NÍVEIS DE CE E DE CA NOS COMPÓSITOS



FONTE: O autor (2017).

A resistência à tração analisa a ligação interna dos materiais, e está relacionada diretamente com a adesão entre a matriz e o reforço. Presume-se que uma relação diretamente proporcional entre a quantidade de reforço e a resistência à tração só ocorre se houver uma boa dispersão da fibra no polímero e uma boa adesão entre o reforço e a matriz.

O aumento da resistência à tração com o aumento do teor de reforço, em compósitos de polímeros e fibras, foi verificado por diversos autores, como Rosa (2007), Gomes et al. (2013) e Margem (2013), entre outros.

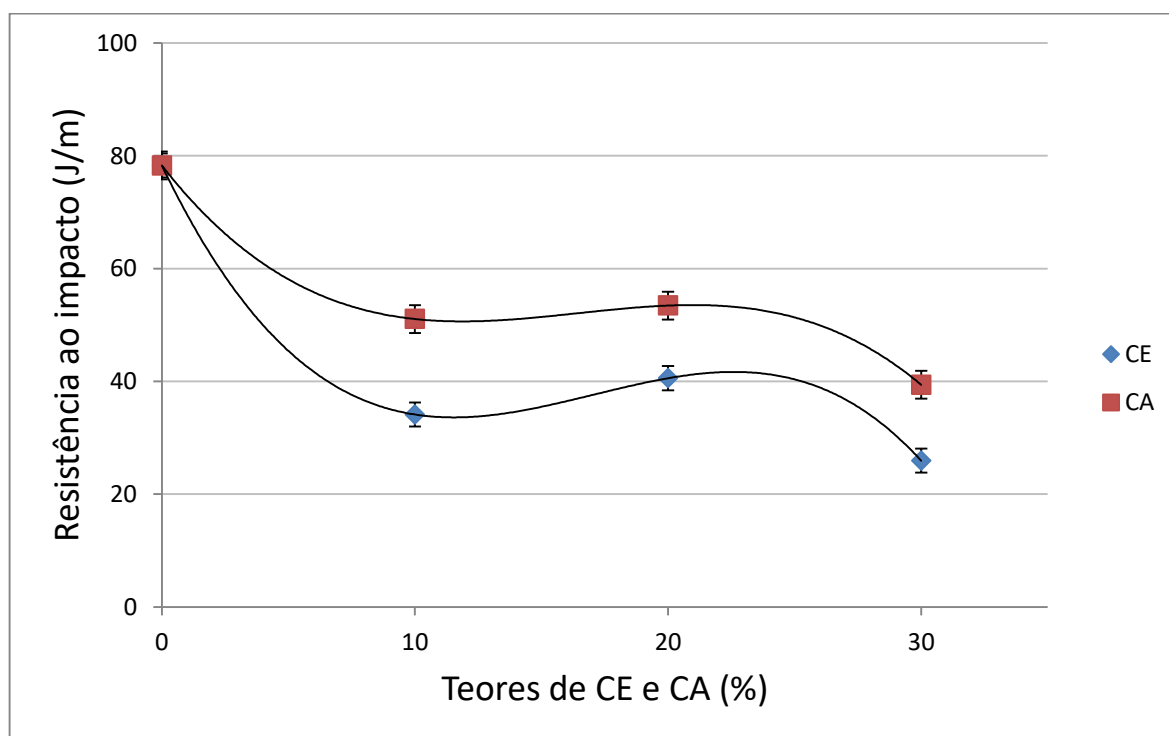
Hillig et al. (2011) estudaram compósitos de PEAD com serragem de eucalipto e chegaram a resultados semelhantes aos deste trabalho, em relação à adição de casca de eucalipto, com um comportamento linear. A matriz pura apresentou o menor valor de resistência à tração e esta foi aumentada conforme se aumentou o teor de reforço.

Neis e Machado (2015) estudaram compósitos de PP com casca de banana-prata. E chegaram a resultados semelhantes aos obtidos com adição de casca de arroz, estudados neste trabalho. A matriz pura apresentou o menor valor de resistência à tração; com 5% de reforço a resistência aumentou e com 15%, diminuiu.

De acordo com a Figura 67, é possível observar que os melhores resultados de resistência à tração para 10%, 20% e 30% de reforço ocorreram com adição de CE. A resistência à tração analisa a ligação interna dos materiais, estando relacionada diretamente com a adesão entre a matriz e o reforço. Diante desse fato, segundo o ensaio morfológico observado nas Figuras 51 a 56, é possível concluir que os melhores resultados ocorreram com CE por apresentarem boa homogeneização na mistura e boa adesão entre fibra/matriz (Figura 51 – 10% de CE) e boa homogeneização em partes das amostras das Figuras 53 (20% de CE) e 55 (30% de CE), em relação às amostras das Figuras 52 (10% de CA), 54 (20% de CA) e 56 (30% de CA), respectivamente. Sendo assim, é possível concluir que os melhores resultados com 10%, 20% e 30% de reforço ocorreram com a utilização de CE, que, de acordo com o ensaio morfológico, em relação a CA, apresentaram melhor homogeneização na mistura e melhor adesão entre fibra/matriz.

De acordo com a Figura 68, para os resultados de resistência ao impacto, vale lembrar que o maior valor obtido foi verificado na ausência de reforço (CE e CA), seguido dos tratamentos com adição de 20% e 10% de CA.

FIGURA 68 - GRÁFICO DOS RESULTADOS DO ENSAIO DE RESISTÊNCIA AO IMPACTO, EM FUNÇÃO DE NÍVEIS DE CE E DE CA NOS COMPÓSITOS



FONTE: O autor (2017).

Compósitos com adição de CA apresentaram comportamento superior aos dos compósitos com adição de CE e a tenacidade da matriz sem reforço foi maior em relação aos compósitos com CE e com CA.

Assim como este trabalho, Ramos (2013), em estudo com compósitos de PP com sabugo de milho, e Azevedo et al. (2016), com compósitos de Ecobrás com casca de arroz, obtiveram decréscimo nos resultados à medida que se aumentava o teor de reforço.

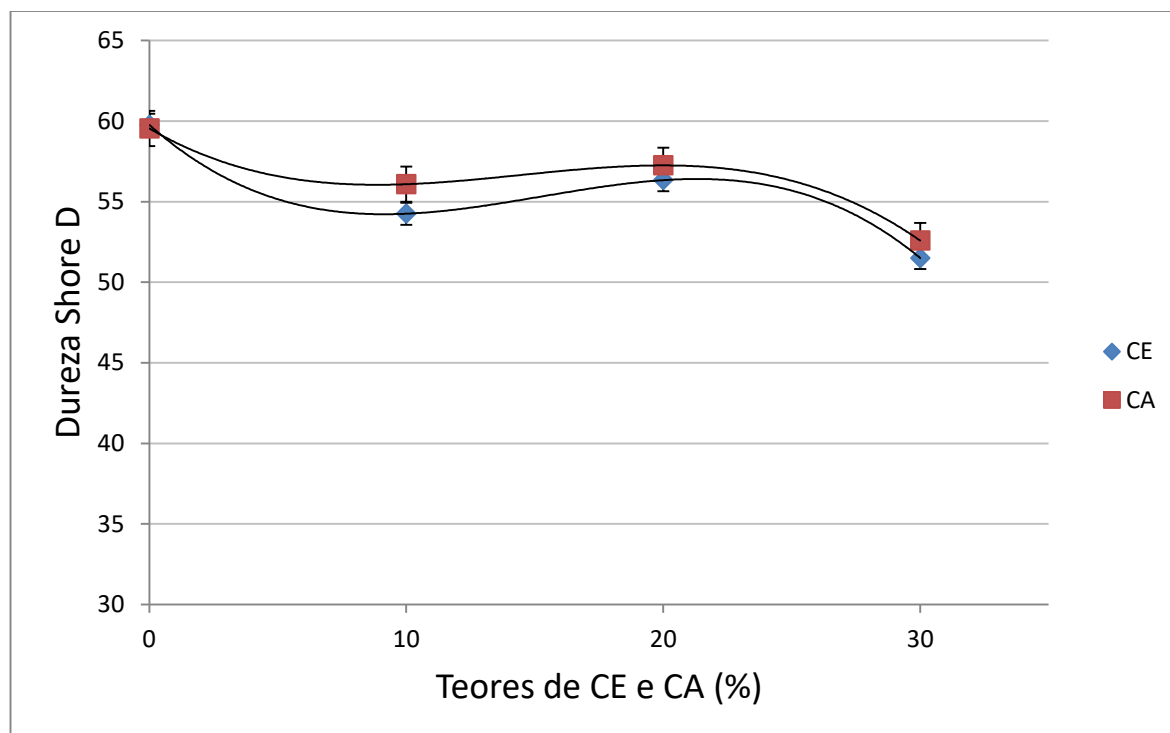
Caraschi et al. (2015) estudaram compósitos de PEAD com serragem de eucalipto e de pinus e constataram, nos dois casos, que houve decréscimo nos resultados com a incorporação de reforço, assim como neste trabalho.

De acordo com a Figura 68, é possível observar que os compósitos com 10%, 20% e 30% de CA apresentaram melhores resultados de resistência ao impacto em relação aos compósitos com 10%, 20% e 30% de CE.

Segundo o ensaio morfológico, observado nas Figuras 59 e 60 (100% BOPP), 51 e 52 (10% de reforço) e 53 e 54 (20% de reforço), foi possível concluir que os melhores resultados foram os que apresentaram ausência de reforço (100% BOPP) e menor porcentagem de reforço (10% e 20% de CA), verificados nas Figuras 52 e 54, respectivamente. A partir destas duas últimas imagens é possível observar que ambos os tratamentos apresentaram ausência de reforço em partes da amostra, confirmando ainda mais que nos tratamentos com ausência de fibras e em compósitos com menores porcentagens de fibras são observados melhores resultados de resistência ao impacto.

De acordo com a Figura 69, em relação ao ensaio de dureza Shore D, houve tendências semelhantes para os reforços CE e CA, ou seja, com adição de CA, assim como com de CE, os resultados apresentaram um decréscimo em relação ao BOPP sem reforço.

FIGURA 69 - GRÁFICO DOS RESULTADOS DO ENSAIO DE DUREZA SHORE D, EM FUNÇÃO DE NÍVEIS DE CE E DE CA NOS COMPÓSITOS



FONTE: O autor (2017).

Massulo et al. (2016) estudaram compósitos de PP com resíduo do tabaco (pó de fumo) e constataram, assim como este trabalho, que houve decréscimo nos resultados com a incorporação de reforço.

Bayer e Riegel (2009), em compósitos à base de PP e casca de arroz, observaram, da mesma forma que este trabalho, que o maior valor de dureza Shore D foi observado na matriz sem reforço e que com 20% e 40% de reforço houve decréscimo nos valores em relação ao PP puro.

Teixeira (2005) estudou diferentes composições de poliéster com farinha de madeira e observou que os teores de fibra não interferiram na melhora dos resultados de dureza.

Santos (2007) analisou compósitos de diferentes composições com fibra de coco e observou que, com teor de até 30% de fibra, os valores de dureza mantiveram-se próximos a 58, assim como neste trabalho, sem muitas alterações em função do teor de reforço na composição do material.

De acordo com estudo de Paiva e Frollini (1999), a dureza Shore D diminui conforme aumenta o conteúdo de fibra. Os autores salientam que, devido às fibras vegetais serem higroscópicas, o aumento do conteúdo eleva o teor de umidade do material. Nesse sentido,

como neste ensaio foi avaliada a dureza da superfície e não a do interior do material, os resultados obtidos não necessariamente estão indicando que a presença das fibras diminui a resistência mecânica à penetração de um corpo, mas podem estar relacionados ao maior potencial higroscópico do compósito.

Hillig et al. (2006), ao contrário deste trabalho, afirmaram que a adição de serragem ao PEAD ocasionou aumento dos valores de dureza. Os autores podem ter alcançado o encapsulamento das fibras encontradas na superfície dos compósitos, o que teria feito com que elas não ficassem expostas à absorção de umidade.

De acordo com a explicação dos autores Paiva e Frollini (1999), o que pode ter influenciado no decréscimo dos resultados com a incorporação das fibras no ensaio de dureza Shore D deste trabalho foi o fato de que, conforme se aumentam os teores de fibras, aumenta-se o teor de umidade do material, diminuindo assim sua dureza.

4.7 CARACTERIZAÇÃO TÉRMICA

4.7.1 Condutividade térmica

A Tabela 16 apresenta valores médios de condutividade térmica de 4 dos 10 tratamentos estudados neste trabalho, que variaram de 0,25 W/m.k a 0,31 W/m.k.

TABELA 16 - VALORES MÉDIOS DE CONDUTIVIDADE TÉRMICA

Equipamentos	Tratamentos	Cod.	Condutividade térmica (W/m.k)
Extrusora + injetora	BOPP 100	1	0,28 b
	BOPP 70 + CA 30	7	0,31 a
Drais + injetora	BOPP 100	8	0,27 b
	BOPP 70 + CA 30	10	0,25 c

FONTE: O autor (2017).

NOTA: Os valores seguidos de mesma letra não apresentam diferença estatística, com nível de significância de 5%.

Nota-se que o Tratamento 10 (BOPP 70 + CA 30), produzido nos equipamentos Drais + injetora, apresentou o menor valor de condutividade térmica, sendo considerado o melhor material compósito para ser empregado como isolamento térmico. A resistência térmica é

inversamente proporcional ao potencial de transmissão de calor de um material. Materiais com essa característica são utilizados para produção de produtos que visam a prover isolamento térmico; como por exemplo: cobertores e paredes com isolantes térmicos.

O pior tratamento para ser utilizado como isolante térmico foi o que obteve maior valor de condutividade térmica, ou seja, o Tratamento 7 (BOPP 70 + CA 30), produzido nos equipamentos extrusora + injetora, que apresentou diferença significativa com relação a todos os demais.

O Tratamento 1 (BOPP 100), produzido nos equipamentos extrusora + injetora, e o Tratamento 8 (BOPP 100), produzido nos equipamentos Drais + injetora, apresentaram valores intermediários entre o melhor e o pior tratamento e não apresentaram diferença significativa entre si, embora tenham apresentado diferença significativa com relação aos demais tratamentos.

Cravo et al. (2014) estudaram casca de amendoim e fibra de coco verde, aglutinadas com resina poliuretana bicomponente à base de óleo de mamona, e obtiveram resultados semelhantes aos encontrados neste trabalho. No que tange à condutividade térmica, o resultado de 0,29 W/m.k de condutividade térmica dos autores citados é inferior ao do melhor tratamento encontrado neste trabalho (0,25 W/m.k).

De acordo com Tabela 17, adaptada de Young (1987) e da Normativa de Desempenho Térmico de Edificações (2003), nem mesmo o melhor tratamento deste trabalho (0,25 W/m.k) apresentou valor superior aos dos materiais isolantes comerciais encontrados no mercado: o poliuretano (0,02 W/m.k), o poliestireno expandido, ou isopor, (0,040 W/m.k), a lã de rocha (0,045 W/m.k) e a lã de vidro (0,045 W/m.k).

O Tratamento 10 (BOPP 70 + CA 30, produzido na Drais + injetora) apresentou condutividade térmica de 0,25 W/m.k. Segundo Whang (1988), materiais que apresentem condutividade térmica menor que 0,25 W/m.k são considerados bons isolantes térmicos.

Segundo Zhou et al. (2010), essa propriedade está relacionada à quantidade de ar presente no material. A baixa condutividade térmica do poliestireno expandido, por exemplo, deve-se à alta quantidade de ar (baixa condutividade térmica e alta resistência térmica) no interior do material – 98,5% de ar (PAPADOPOULOS, 2005).

Os materiais isolantes inorgânicos (fibra de vidro, lã de rocha, espuma de polietileno e espuma de poliuretano) apresentam altos índices de toxicidade (LIANG; HO, 2007). A busca por materiais isolantes que possam ser menos agressivos ao ambiente e aos seres vivos, como os materiais compósitos estudados neste trabalho, tem forte apelo, uma vez que são normalmente queimados no processo de descarte usual (GULER et al., 2007).

TABELA 17 - CONDUTIVIDADE TÉRMICA DE DIVERSOS MATERIAIS

Material	Condutividade térmica (W/m.k)	Nível de condutividade térmica e isolamento térmico
Diamante	1000	
Prata	406	Altíssima condutividade térmica e baixíssimo isolamento térmico
Cobre	385	
Ouro	314	
Latão	109	
Alumínio	205	
Ferro	79,5	Alta condutividade térmica
Aço	50,2	e
Gelo	1,6	baixo isolamento térmico
Tijolo	0,4 - 0,8	
Vidro comum	0,8	
Concreto	0,8	
Água a 20 °C	0,6	
*BOPP 70 + CA 30 (extrusora + injetora)	0,31	Baixa condutividade térmica e alto isolamento térmico
*BOPP 100 (extrusora + injetora)	0,28	
*BOPP 100 (Drais + injetora)	0,27	
*BOPP 70 + CA 30 (Drais + injetora)	0,25	
PVC	0,2	
Madeira compensado	0,12	
Lãs de vidro e de rocha	0,045	
PS expandido - isopor	0,04	Baixíssima condutividade térmica
Cortiça	0,04	e
Espuma poliuretano	0,02	altíssimo isolamento térmico
Oxigênio (20 °C)	0,02	

FONTE: Adaptado de Young (1987) e da Normativa de Desempenho Térmico de Edificações (2003).

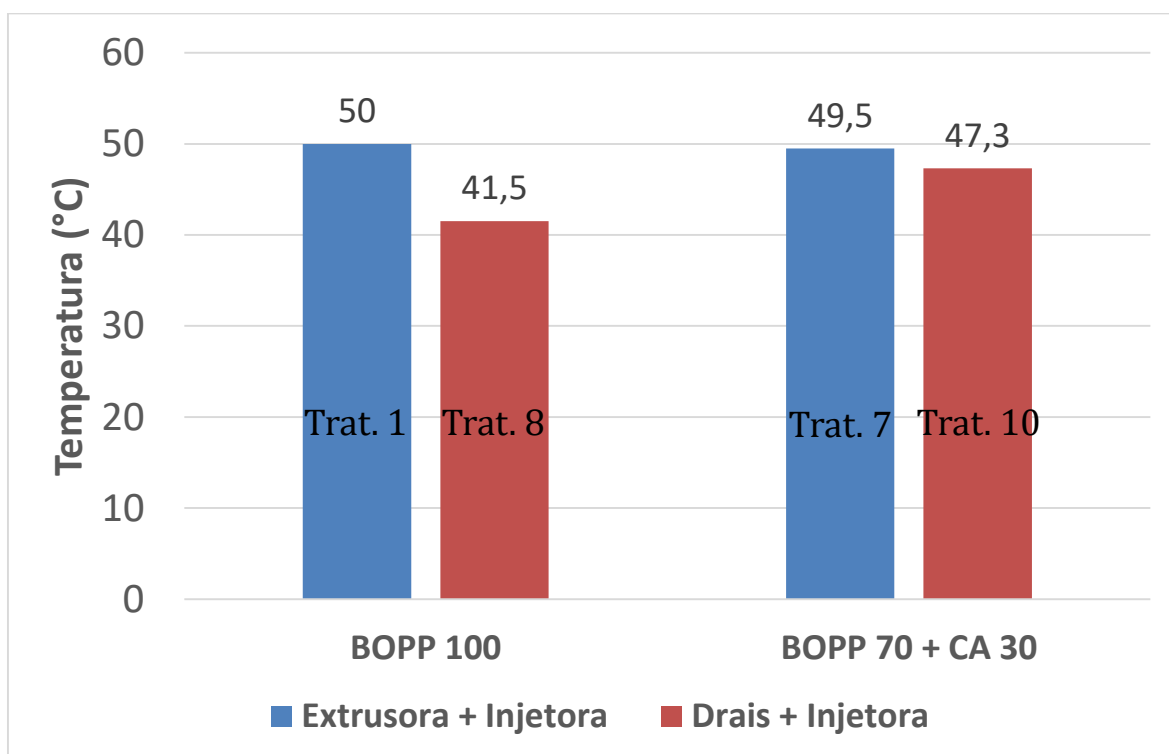
NOTA: *Compósitos testados neste trabalho.

4.8 CARACTERIZAÇÃO TERMOMECÂNICA

4.8.1 Temperatura de deflexão sob aquecimento (HDT)

A Figura 70 apresenta valores médios de temperatura de deflexão sob aquecimento (HDT) de 4 dos 10 tratamentos estudados neste trabalho, que variaram de 41,5 °C a 50 °C.

FIGURA 70 - TEMPERATURA DE DEFLEXÃO SOB AQUECIMENTO, HDT (°C), DE TRATAMENTOS PRODUZIDOS NA EXTRUSORA + INJETORA E NA DRAIS + INJETORA



FONTE: O autor (2017).

O Tratamento 1 (BOPP 100) e o Tratamento 7 (BOPP 70 + CA 30), ambos produzidos na extrusora + injetora, apresentaram os maiores valores de HDT.

Os piores resultados de HDT foram os dos Tratamentos 8 (BOPP 100) e 10 (BOPP 70 + CA 30), ambos produzidos na Drais + injetora.

No ensaio de HDT, quanto mais alta a temperatura encontrada, maior a resistência do material. Sendo assim, a extrusora apresentou influência sobre os melhores resultados e a Drais, sobre os piores resultados de HDT.

O forro de policloreto de vinila (PVC), um dos tipos de forro mais utilizados na construção civil, de acordo com Sigma (2016), para evitar deformações, não pode ultrapassar a temperatura de 50 °C.

Nota-se que o melhor resultado de HDT, o do Tratamento 1 (BOPP 100), produzido na extrusora + injetora, apresentou temperatura de 50 °C, suportando, portanto, a mesma temperatura que o forro de PVC.

O Tratamento 7 (BOPP 70 + CA 30), também produzido na extrusora + injetora, apresentou temperatura bem próxima à do Tratamento 1 (BOPP 100) e do forro de PVC.

4.9 CONSIDERAÇÕES FINAIS

4.9.1 Caracterização mecânica, térmica e termomecânica dos materiais compósitos

A Tabela 18 apresenta de forma simplificada os melhores e piores tratamentos dos ensaios mecânicos, térmicos e termomecânicos.

TABELA 18 - MELHORES E PIORES TRATAMENTOS DOS ENSAIOS MECÂNICOS, TÉRMICOS E TERMOMECÂNICOS

Ensaio	Melhores tratamentos	Piores tratamentos
Resistência à tração	BOPP 80 + CE 20 (extrusora)	BOPP 100 (Drais)
	BOPP 70 + CE 30 (extrusora)	BOPP 100 (extrusora)
Flexão – MOR	BOPP 70 + CA 30 (Drais)	BOPP 100 (Drais)
	BOPP 90 + CA 10 (extrusora)	BOPP 100 (extrusora)
Flexão – MOE	BOPP 70 + CE 30 (Drais)	BOPP 100 (Drais)
	BOPP 70 + CA 30 (Drais)	BOPP 100 (extrusora)
Resistência ao impacto	BOPP 100 (extrusora)	BOPP 70 + CE 30 (Drais)
	BOPP 100 (Drais)	BOPP 70 + CE 30 (extrusora)
Dureza Shore D	BOPP 100 (extrusora)	BOPP 70 + CE 30 (Drais)
	BOPP 100 (Drais)	BOPP 70 + CA 30 (Drais)
		BOPP 70 + CE 30 (extrusora)
		BOPP 70 + CA 30 (extrusora)
Condutividade térmica	BOPP 70 + CA 30 (extrusora)	BOPP 70 + CA 30 (Drais)
Isolamento térmico	BOPP 70 + CA 30 (Drais)	BOPP 70 + CA 30 (extrusora)
HDT	BOPP 100 (extrusora)	BOPP 100 (Drais)
	BOPP 70 + CA 30 (extrusora)	BOPP 70 + CA 30 (Drais)

FONTE: o autor (2017).

4.9.2 Avaliação dos efeitos do processo produtivo e do tipo de reforço no desempenho mecânico, térmico e termomecânico dos compósitos

A Figura 71 apresenta os efeitos do processo produtivo e do tipo de reforço no desempenho mecânico e térmico dos compósitos.

FIGURA 71 - EFEITOS DO PROCESSO PRODUTIVO E DO TIPO DE REFORÇO NO DESEMPENHO MECÂNICO, TÉRMICO E TERMOMECÂNICO DOS COMPÓSITOS

Ensaio	Extrusora + injetora		Drais + injetora		Bopp sem reforço	Adição de CE	Adição de CA
Resistência à tração	Reforço melhorou a matriz	CE foi melhor	Reforço melhorou matriz	Similaridade no uso de CE e CA	Melhor na extrusora	Independente do processo utilizado	Melhor na Drais
Flexão-MOR	Reforço melhorou a matriz	Similaridade no uso de CE e CA	Reforço melhorou matriz	Similaridade no uso de CE e CA	Independente do processo utilizado	Independente do processo utilizado	Melhor na Drais
Flexão-MOE	Reforço melhorou a matriz	Similaridade no uso de CE e CA	Reforço melhorou matriz	CE foi melhor	Independente do processo utilizado	Melhor na Drais	Melhor na Drais
Resistência ao impacto	Reforço piorou a matriz	CA foi melhor	Reforço piorou a matriz	CA foi melhor	Independente do processo utilizado	Independente do processo utilizado	Independente do processo utilizado
Dureza Shore D	Reforço piorou a matriz	Similaridade no uso de CE e CA	Reforço piorou a matriz	Similaridade no uso de CE e CA	Independente do processo utilizado	Independente do processo utilizado	Independente do processo utilizado
Isolante térmico	Reforço piorou a matriz	—	Reforço melhorou a matriz	—	Independente do processo utilizado	—	Melhor na Drais
HDT	Independente do uso de reforço	—	Reforço melhorou a matriz	—	Melhor na extrusora	—	Melhor na extrusora

FONTE: o autor (2017).

4.9.3 Avaliação dos efeitos do processo produtivo e do tipo de reforço no desempenho mecânico dos compósitos

A Tabela 19 apresenta os efeitos do processo produtivo e do tipo de reforço no desempenho mecânico dos compósitos.

TABELA 19 - AVALIAÇÃO DOS EFEITOS DO PROCESSO PRODUTIVO E DO TIPO DE REFORÇO NO DESEMPENHO MECÂNICO DOS COMPÓSITOS

	P	R	P * R
Resistência à tração	-	-	CE melhor extrusora melhor
Flexão-MOR	-	-	CA melhor Drais melhor com CA
Flexão-MOE	Drais melhor	CE melhor	-
Resistência ao impacto	-	CA melhor	-
Dureza Shore D	-	CA melhor	-

FONTE: O autor (2017).

4.9.4 Síntese dos resultados

- Os resultados indicam um melhor desempenho dos tratamentos produzidos no misturador termocinético Drais, em relação aos produzidos na extrusora;
- Com relação à matriz sem reforço, a extrusora mostrou influência no ensaio de resistência à tração. Para adição de CE, a Drais mostrou influência no ensaio de MOE. Já para adição de CA, a Drais mostrou influência nos ensaios de MOR e MOE, na resistência à tração e no isolamento térmico;
- Os resultados indicam um melhor desempenho da casca de eucalipto (CE) em relação a casca de arroz (CA);
- Os resultados indicam que a incorporação dos reforços (CE e CA) melhoraram as propriedades de flexão MOR e MOE e resistência à tração, nos dois equipamentos (extrusora e Drais) e do isolamento térmico na Drais. Por outro lado, a resistência ao impacto e a dureza Shore D apresentaram decréscimo nos valores com a incorporação de reforço, nos dois equipamentos (extrusora e Drais) e no isolamento térmico na extrusora;
- O tipo de casca, utilizando-se extrusora, influenciou significativamente na resistência à tração e na resistência ao impacto dos compósitos;
- O tipo de casca, utilizando-se a Drais, influenciou significativamente no módulo de elasticidade e na resistência ao impacto dos compósitos;
- O tratamento que apresentou melhores resultados foi o compósito com 30% de reforço (CA), BOPP 70 + CA 30, produzido na Drais + injetora;

- Os tratamentos que apresentaram piores resultados foram os relativos à matriz sem reforço (BOPP 100), tanto produzidos na extrusora + injetora como na Drais + injetora;
- Houve melhor adesão entre fibra e matriz nos compósitos confeccionados por extrusão, em relação aos confeccionados na Drais;
- As cascas de eucalipto apresentaram melhor adesão com a matriz, em relação às cascas de arroz;
- O material compósito que apresentou melhor homogeneidade na mistura e melhor adesão fibra/matriz foi o do Tratamento 2, BOPP 90 + CE 10, produzido na extrusora + injetora;
- Os vazios – bolhas de ar – foram observados em todos os tratamentos, com exceção dos tratamentos com ausência de reforço (BOPP 100), tanto produzidos na extrusora como na Drais. Esses vazios foram observados em maior proporção nos compósitos com cascas de eucalipto, em relação aos compósitos com cascas de arroz, e nos compósitos processados na extrusora, em relação à Drais;
- O tratamento 10 (BOPP 70 + CA 30, produzido na Drais) apresentou condutividade térmica de 0,25 W/m.K, o que corresponde a um bom nível de isolamento térmico;
- Os resultados de temperatura de deflexão sob aquecimento (HDT) indicam um melhor desempenho dos tratamentos produzidos na extrusora, sendo que o tratamento com a matriz sem reforço (BOPP 100) produzido na extrusora + injetora foi considerado o melhor, atingindo a mesma temperatura que o forro de PVC (50 °C).
- Nos estudos das propriedades de fluxo – análise de índice de fluidez – observou-se baixa fluidez (alta viscosidade) no BOPP sem reforço (3,1 g/10 min). Devido à incorporação de fibras ao BOPP diminuir sua fluidez e aumentar ainda mais sua viscosidade, não foi possível escoar o material do equipamento, o que impediu a avaliação de índices de fluidez do compósito;
- A elevada viscosidade do BOPP e dos materiais compósitos não dificultou o processamento por extrusão, porém os tratamentos processados no equipamento misturador termocinético Drais apresentaram alguma dificuldade na moldagem por injeção.

5 CONCLUSÕES

Neste trabalho foram produzidos materiais compósitos a partir da mistura entre a matriz BOPP aluminizado (polipropileno biorientado) e cascas de eucalipto (CE) e de arroz (CA), utilizados como reforço, processados nos seguintes equipamentos: a) extrusora + injetora e b) Drais + injetora. Foram avaliadas as propriedades mecânicas e térmicas desses materiais compósitos, que apresentaram bom desempenho mecânico, considerando que nenhuma resina foi adicionada e não houve quaisquer tratamentos das fibras.

Confirmou-se a viabilidade técnica de utilização de resíduos sólidos industriais (BOPP e CE) e agroindustrial (CA) na produção de compósitos fibra-polímeros, sendo que o controle dos processos utilizados é fundamental para a qualidade do produto final.

O emprego dos resíduos como matéria-prima para produção de compósitos se mostrou eficaz nos dois equipamentos testados, extrusora dupla rosca e misturador termocinético Drais. Os melhores resultados foram encontrados nos tratamentos produzidos na Drais, que apresentaram, ainda, menor quantidade de vazios – bolhas de ar – em relação aos produzidos na extrusora. O que ocasionou maior quantidade desses vazios na extrusora foi o fato de a bomba de vácuo não estar funcionando no momento da produção dos compósitos. Porém, pelo fato de o processo utilizado na Drais ser por batelada, a extrusora se torna mais eficiente, levando em consideração o rendimento da produção.

Fatores como o tipo de fibra e o diâmetro influenciam na produção dos materiais compósitos. Fibras com maior razão de aspecto (CA) apresentam menor homogeneidade em relação a fibras com menor razão de aspecto (CE). Dessa forma conclui-se que a razão de aspecto de uma fibra interfere significativamente nos resultados. Fibras com maior módulo de finura são fibras mais grossas. A CE tem módulo de finura menor que a CA. Sendo assim, fibras como a CE possuem melhor adesão com a matriz em relação às fibras de CA. Dessa forma, os resultados deste trabalho indicam um melhor desempenho da CE em relação à CA, ou seja, a CE é um tipo melhor de fibra, trazendo ao compósito melhor homogeneidade e melhor adesão entre fibra e matriz.

De acordo com a avaliação morfológica, obtida com microscópio estéreo, com aumento de 50 vezes, foi possível identificar melhor adesão entre fibra e matriz nos compósitos confeccionados por extrusão, em relação aos confeccionados na Drais. Já com relação ao reforço na matriz, as cascas de eucalipto apresentaram melhor adesão com a matriz de BOPP, em relação às cascas de arroz. A melhor homogeneidade na mistura e a melhor adesão fibra/matriz foram observadas no Tratamento 2 – BOPP 90 + CE 10, produzido na

extrusora + injetora. Com relação aos vazios – bolhas de ar, eles foram observados em todos os tratamentos, com exceção daqueles com ausência de reforço (BOPP 100), tanto produzidos na extrusora como na Drais. Esses vazios foram observados em maior proporção nos compósitos com cascas de eucalipto, em relação aos compósitos com cascas de arroz, e nos compósitos processados na extrusora, em relação aos processados na Drais.

As cascas são uma ótima alternativa como reforço em compósitos, de custo baixo, e são resíduos pouco aproveitados. Com isso pode-se evitar maior utilização de recursos naturais não renováveis e reduzir ao máximo as agressões ao meio ambiente. Já com relação à reutilização do BOPP aluminizado, deixa-se de desperdiçar o petróleo, advindo de fontes não renováveis, e também a bauxita, matéria-prima para produção do alumínio, que muitas vezes é extraída da natureza de maneira predatória, causando a desertificação do solo.

6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Para melhorar as propriedades finais dos tratamentos estudados neste trabalho, ficam como sugestões:

- Diminuir a quantidade de fibras com granulometrias menores (abaixo de 0,250 mm), para melhorar as propriedades mecânicas;
- Avaliar o efeito da adição de agentes compatibilizantes, para melhorar a adesão na interface das fibras com a matriz de BOPP;
- Tratar previamente as fibras de cascas de eucalipto (CE) e de arroz (CA) com solução alcalina de NaOH em 10%, o que pode resultar em compósitos duas vezes mais resistentes que aqueles com fibras não tratadas;
- Fazer o mesmo trabalho, com os mesmos tratamentos, utilizando processos diferentes, como a prensagem a quente, principalmente se forem com painéis em camadas;
- Avaliar o desempenho acústico, como o isolamento acústico e a absorção sonora dos materiais compósitos deste trabalho.

REFERÊNCIAS

- ABIPLAST. **Processos de transformação para materiais plásticos**. Associação Brasileira da Indústria do Plástico. 2016. Disponível em: <http://file.abiplast.org.br/download/links/links%202014/apresentacao_sobre_transformacao_vf.pdf>. Acesso em: 20 dez. 2016.
- ABNT 02:135.07-001/2. **Desempenho térmico de edificações parte 2: métodos de cálculo da transmitância térmica, capacidade térmica, do atraso térmico e do fator solar de elementos e componentes de edificações**. Rio de Janeiro, 2003. 28p.
- ABTCP – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA TÉCNICA DE CELULOSE E PAPEL. 1974. **Métodos de ensaio**. São Paulo.
- AGRIANUAL. **Anuário da Agricultura Brasileira**, São Paulo, 2015, p. 398-399.
- AGRIZANI, C. A. et al. Influência do comprimento da fibra de sisal e do seu tratamento químico nas propriedades de compósitos com poliéster. In: CBECIMat, **CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA E CIÊNCIA DOS MATERIAIS, 17., 2006**, Foz do Iguaçu – PR.
- ALZATE, S. B. A. **Caracterização da madeira de árvores de clones de *Eucalyptus grandis*, *E. saligna* e *E. grandis* x *urophylla***. 2004. 133 f. Tese (Doutorado em Recursos Florestais) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, 2004.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D2565-99**: standard practice for xenon-arc exposure of plastic intended for outdoor applications. Philadelphia, 1999. v. 8, 4 p. Annual Book of ASTM Standards.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D3878-01**: Standard Terminology for composite materials. ASTM International. West Conshohocken, Pa., U.S.A., 2001.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM E1530-11**: Standard Test Method for Evaluating the Resistance to Thermal Transmission of Materials by the Guarded Heat Flow Meter Technique. United States, 2011. v. 14.02, 9 p. Annual Book of ASTM Standards.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D648 – 16**: Standard Test method for deflection temperature of plastics under flexural load in the edgewise position. ASTM International. West Conshohocken, Pa., U.S.A., 2016.
- AMICO, S. C. **APOSTILA**: mini-curso materiais compósitos poliméricos. Joinville, 2006.
- ARDANUY, M.; ANTUNES, M.; VELASCO, J. I. Vegetable fibres from agricultural residues as thermo-mechanical reinforcement in recycled polypropylene-based green foams. **Waste Management**, v. 32, n. 2, p. 256-263, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10004**: resíduos sólidos: classificação. Rio de Janeiro, 2004. 71 p.

AZEVEDO, J. B. et al. Caracterização de compósitos obtidos a partir de polímero biodegradável e casca de arroz utilizando duas técnicas de processamento. **Revista Matéria**. v. 21, n. 2, p. 391-406, 2016.

BAILLIE, C. **Green Composites**: Polymer Composites and the Environment. Taylor & Francis Group, 2005.

BALASURIYA, P. W., MAI, Y. W. Mechanical properties of wood flake-polyethylene composites. Part I: effects of processing methods and matrix melt flow behaviour. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, v 32, p. 619-629, 2001.

BAYER, D. R.; RIEGEL, I. C. Estudo e Caracterização de Perfis Fabricados a Partir de Polipropileno Reciclado e Casca de Arroz. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE POLÍMEROS, 10, 2009, Foz do Iguaçu – PR. **Anais...** São Paulo: Associação Brasileira de polímero, 2009.

BERALDO, A. L. Compósitos biomassa vegetal-cimento. In: GHAVAMI K.; TOLEDO FILHO, R.D.; NASCIMENTO W.J. **Materiais não-convencionais para construções rurais**. Campina Grande: Universidade Federal da Paraíba/Marcone. p.1-48. 1997.

BILLMEYER JR., F. W. **Textbook of polymer science**. USA: John Willey & Sons, 2 ed., 598 p. 1971.

BISPO, S. J. L. **Estudo das propriedades mecânicas de biocompósitos de polipropileno reforçados com fibras naturais**. 2011. 97f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal-RN. 2011.

BLEDZKI, A. K., LETMAN, M., VIKSNE, A., RENCE, L. A comparison of compounding processes and wood type for wood fibre - PP composites. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, v 36, p. 789-797, 2005.

BLEDZKI, A. K.; MANUN, A. A.; VOLK, J. Barley husk and coconut shell reinforced polypropylene composites: The effects of fiber physical, chemical and surface properties. **Composites Science and Technology**, v. 70, n. 5, p. 840-846, May 2010.

BLEDZKI, A.K. et al. Processing techniques for natural and wood fibre composites. **Properties and performance of natural-fibre composites**. ed. Pickerning. p.163-190, 2008.

BLEDZKI, A. K.; GASSAN, J. Composite Reinforced with Celulose Based Fibres. **Progress in Polymer Science**. v.24, p.200-272, 1999.

BLEDZKI, A. K.; GASSAN, J.; ZHANG, W. Impact Properties of Natural Fiber-Reinforced Epoxy Foams. **Journal of Cellular Plastics**. v. 35, n. 6, 1999.

BOSHOFF, W. P., MECHTCHERINE, V., ZIJL, G. P. A. G. “Characterising the Time-Dependant Behaviour on the Single Fibre Level of SHCC: Part 2: The Rate Effects on Fibre Pull-out Tests”, **Cement and Concrete Research**, v. 39, pp. 787-797, 2009.

BRANDRUP, J.; IMMERGUT, E.H.; GRULKE, E.A. **Polymer Handbook**. New York: John Wiley, 1999. V/21-V/28.

BRASIL ECONÔMICO. **Embalagem metalizada ganha valor na reciclagem**. 2010. Disponível em: <http://www.brasileconomico.com.br/noticias/embalagem-metalizada-ganha-valor-na-reciclagem_95679.html>. Acesso em: 12 jun. 2015.

BRUM, S. S. **Caracterização e modificação química de resíduos sólidos do beneficiamento do café para produção de novos materiais**. 2007. 138 f. Dissertação (Mestrado em Agrobioquímica) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2007.

BRUM, S. S. et al. Caracterização química do resíduo da colheita de feijão (palha de feijão). In: CONGRESSO DOS PÓS-GRADUANDOS DA UNIVERSIDADE FEDERAL DE LAVRAS, 15., 2006, Lavras. **Anais...** Lavras: UFLA, CD-ROM.

CALLISTER, J.; WILLIAM D. **Ciência e engenharia de materiais: uma introdução**. 7. ed. Rio de Janeiro: LTC. 705 p. 2008.

CANILHA, L. et. al. Sacarificação da biomassa lignocelulósica através de pré-hidrólise ácida seguida por hidrólise enzimática: uma estratégia de “desconstrução” da fibra vegetal. **Revista Analytica**, v.44, p. 48-54, 2010.

CANTO, E. L. **Plástico: bem supérfluo ou mal necessário?** São Paulo: Moderna. 88 p. 1995.

CARASCHI, J. C. et al. Compósitos de polipropileno reforçado com capim-elefante. **Brazilian Journal of Biosystems Engineering**. v. 9, n. 3, p. 236-246, 2015.

CARASHI, J. C.; LEÃO, A. L. Congresso Brasileiro de Polímeros, in: **Anais do 6º Congresso de Polímeros**, 2001, Gramado, RS, p. 566, 2001.

CARNEIRO, A. de C. O. et al. Efeito da hidrólise ácida dos taninos de *Eucalyptus grandis* w. hill ex maiden nas propriedades dos adesivos tânicos. **Revista Árvore**. Viçosa – MG.v.33, n.4, p.733-739, 2009.

CARVALHO, B.L. **Produção de polipropileno bi-orientado (BOPP): tecnologia e aplicações**. 2008. 44f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Instituto Politécnico de Bragança, Bragança, 2008.

CARVALHO, C. **Reciclagem primária de ABS: propriedades mecânicas, térmicas e reológicas**. 2009. Dissertação (Mestrado Ciência e Engenharia de Materiais) – Universidade do Estado de Santa Catarina – UDESC, Centro de Ciências Tecnológicas, Joinville, 2009.

CEREALISTA GUACIRA ALIMENTOS LTDA. **Arroz**. Santa Cruz do Rio Pardo-SP, 2014. Disponível em: <<http://www.guacira.com.br>>. Acesso em: 17 abr. 2014.

CHAMBERS, A. R.; EARL, J. S.; SQUIRES, C. A.; SUHOT, M. A. - **Int. J. Fat.**, v. 28, p.1389 (2006).

CHAMMA, P. V. C. **Produção de painéis a partir de resíduos sólidos para uso como elemento arquitetônico**. 2004. 138 f. Tese (Doutorado em Agronomia) - Faculdade de Ciências Agrônomicas, UNESP - Botucatu, 2004.

CHAN, A. W.; HWANG, S. Mold-filling simulations for the injection molding of continuous fiber-reinforced polymer. *Polymer Engineering & Science*. v. 28, n. 5, p. 333-339, 1988.

CHEN, T. Y. **Studies on the manufacture of particleboard from rice hulls in industrial scale**. K'o Hsueh Fa Chan Yueh K'an, China, v. 8, n. 5, p. 456-462, 1980.

CHIELLINI, E. et al. Composite films based on waste gelatin: thermal-mechanical properties and biodegradation testing. **Polymer Degradation and Stability**, v.73, p. 549-555, 2001.

CLEMONS C. M., IBACH, R. E. Effects of processing method and moisture history laboratory fungal resistance of wood-HDPE composites. **Forest Products Journal**.v. 54, n. 4, p. 50-57, 2004.

CORDEBELLO, F. S. Índice de fluidez do BOPP. **Polímeros: Ciência e Tecnologia**, Jan/Mar – 1999.

CORREA, C. A. et al. Compósitos termoplásticos com madeira. **Polímeros: Ciência e Tecnologia**, São Carlos, v.13, n. 3, p. 154-165, 2003.

CORREA, C. A. **Laboratório de blendas e compósitos termoplásticos**. Palestra. Itatiba: Universidade São Francisco, 2004.

CORRÊA, G. R. **Desenvolvimento, produção e caracterização de compósitos de madeira-plásticos para aplicação na indústria moveleira**. 2004. 111 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) – Universidade Estadual de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2004.

COSTA, M. L.; ALMEIDA, S. F. M.; REZENDE, M. C. Resistência ao cisalhamento interlaminar de compósitos com resina epóxi com diferentes arranjos das fibras na presença de vazios. **Polímeros: Ciência e Tecnologia**. v. 1, p.182-189 , n.4, 2001.

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

CRUZ, J. M. et al. Preparation of fermentation media from agricultural wastes and their bioconversion to xylitol. **Food Biotechnology**,New York, v. 14, p. 79-97, 2000.

CURVELO, A.A.S.; DE CARVALHO, A.J.F.; AGNELLI, J.A.M. Thermoplastic starchcellulosic fibers composites: preliminary results. **Carbohydrate Polymers**, v.45, p. 183-188, 2001.

d'ALMEIDA, J. R. M., AQUINO, R. C. M. P., MONTEIRO, S. N., 2006, "Tensile Mechanical Properties Morphological Aspects and Chemical Characterization of Piassava (*Attalea funifera*) Fibers", **Composites: Part A**, v. 37, pp. 1473–1479.

DELLA, V. P., KÜHN, I., HOTZA, D. Caracterização de cinza de casca de arroz para uso como matéria-prima na fabricação de refratários de sílica. **Química Nova**. São Paulo, v. 24, n.6, p.778-782, 2001.

DEMIRBAS, A. Relationships between lignin contents and fixed carbon contents of biomass samples. **Energy Conversion Management**, 44, 1481-1486, 2003.

DWIVEDI, U. K.; CHAND N. Influence of MA-g-PP on abrasive wear behaviour of chopped sisal fibre reinforced polypropylene composites. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 209, n. 12-13, p. 5371-5375, Jul 2009. ISSN 0924-0136.

ECKERT, C. H. Market opportunities for natural fibers in plastics composites. In: **PROCEEDING OF THE WOOD-PLASTIC CONFERENCE**, 2000, Baltimore. Conference... Baltimore, USA, 2000. p. 87-106.

EMBALAGEM SUSTENTÁVEL. 2012. **Embalagens metalizadas flexíveis I**. Disponível em:<http://embalagensustentavel.com.br/2012/06/18/embalagens-metalizadas-i/>. Acesso em: 04 nov. 2015.

ESBENTO. 2000. **Engenho São Bento**. Disponível em:<www.esbento.com.br>. Acesso em: 04 fev. 2015.

FISHERS SCIENTIFIC. **Carl Zeiss Stemi 2000/2000C Stereomicroscopes**, 2016. Disponível em: <<https://www.fishersci.com/shop/products/carl-zeiss-stemi-2000-2000c-stereomicroscopes-2/p-155083>> Acesso em: 03 de mar. 2016.

FOELKEL, C. Resíduos sólidos industriais do processo de fabricação de celulose e papel de eucalipto – Parte 04: “Casca suja”. **Eucalyptus Online Book and Newsletter**, p. 101, 2010.

FOELKEL, C. Utilização da Biomassa do Eucalipto para Produção de Calor, Vapor e Eletricidade: Parte 1: Biomassa Florestal & Florestas Energéticas. **Eucalyptus Online Book & Newsletter**. 239p. 2016.

FONSECA, F. M. C. **Desenvolvimento e caracterização de compósitos à base de Polietileno de Alta Densidade (PEAD) reciclado e fibras vegetais**. Belo Horizonte, 2005. 133 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2005.

FONSECA, M. R. G. **Isolantes térmicos fabricados a partir de cinza de casca de arroz: Obtenção, caracterização de propriedades e sua relação com a microestrutura**. 1999. 84 f. Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1999.

FRANCO, P. H.; VEGA, M. A. Effect of fiber treatment on the mechanical Properties of LDPE-Henequen Cellulosic fiber composites. **Journal Applied Polymer Science**. v. 65, n.1, p.197-207, 1997.

FURLAN, L. G.; DUARTE, U. L.; MAULER, R. S. Avaliação das propriedades de compósitos de polipropileno reforçados com casca de aveia. **Química Nova**, v. 35, n. 8, p.1499-1501, 2012.

- GAYER, U.; SCHUH, T. G. Automotive application of natural fibres composites. In: **Proceedings of the First International Symposium on Lignocellulosic Composites**. 1996.
- GOIVINDARAO, V. M. H. Utilization of Rice Husk – A Preliminary Analysis. **Journal of Scientific and Industrial Research**. v. 39, p. 495-515, 1980.
- GOMES, T. S. et al. Substituição da fibra de vidro por fibra de bananeira em compósitos de polietileno de alta densidade. Parte 1. Avaliação mecânica e térmica. **Polímeros**, v. 23, n. 2, p. 206-211, 2013.
- GRUNENFELDER, L. K.; NUTT, S. R. Void formation in composite prepregs – Effect of dissolved moisture. **Composites Science and Technology**. v. 70, p. 2304-2309, 2010.
- GULER, C. et al. The manufacture of particleboards using mixture of peanut (*Arachis hypogaea*) and European Black pine (*Pinus nigra* Arnold) wood chips. **Bioresource Technology**, v.99, p.2893-2897, 2007.
- HAMOUSH, S. et al. 2010, “Pullout Characterizations of Various Steel Fibers Embedded in Very High-Strength Concrete”, **American J. of Engineering and Applied Sciences**, v.3, pp. 418-426.
- HARADA, J.; UEKI, M. M. **Injeção para Termoplásticos – produtividade com qualidade**. Editora Artliber, 269 páginas, São Paulo, 2010.
- HILLIG, E. et al. Modelagem de misturas na fabricação de compósitos polímero-fibra, utilizando polietileno e serragem de *pinus sp*. **Ciência Florestal**. v. 16, n. 3, p. 343-351, 2006.
- HILLIG, E. et al. Caracterização de compósitos produzidos com polietileno de alta densidade (HDPE) e serragem da indústria moveleira – parte II – extrusão em dupla-rosca. **Ciência Florestal**. v. 21, n. 2, p. 335-347. 2011.
- HOUSTON, D.F. **Rice Chemistry and Technology**. Monograph Series. Minnesota: American Association of Cereal Chemists. 1972. 517 p.
- IBÁ – Indústria Brasileira de Árvores. **Indicadores do setor brasileiro de árvores plantadas 2015**: ano base 2014. Brasília, p.49-65, 2015.
- ISHIZAKI, M. H. et al. Caracterização Mecânica e Morfológica de Compósitos de Polipropileno e Fibras de Coco Verde: Influência do Teor de Fibra e das Condições de Mistura. **Polímeros: Ciência e Tecnologia**. v. 16, n. 3. p.182-186. 2006.
- JAYARAMAN, K. Manufacturing sisal-polypropylene composites with minimum fibre degradation. **Composites Science and Technology**, v. 63, n. 3-4, p. 367-374, 2003. ISSN 0266-3538.
- JIANG, H. et al. Mechanical properties of poly (vinyl chloride)/wood flour/glass fiber hybrid composites. **Journal of Vinyl and Additive Technology**, v. 9, p. 138, 2003.
- JIANG, H.; KAMDEM, P. Development of poly (vinyl chloride)/wood composites:A literature review. **Journal of Vinyl and Additive Technology**, v. 10, n. 2, p. 59-69, 2004.

JOSEPH, K.; MEDEIROS, E. S.; CARVALHO, L. H. Compósitos de matriz poliéster reforçados por fibras curtas de sisal. **Polímeros: Ciência e Tecnologia**, São Carlos, p. 136-141, 1999.

KALAPRASAD, G. et al. Effect of fibre length and chemical modifications on the tensile properties of intimately mixed short sisal/glass hybrid fibre reinforced low density polyethylene composites. **Polymer International**. v. 53, n. 11, p. 1624-1638, 2004.

KLOCK, U. et al. **Química da madeira**. 3. ed. rev. Curitiba: UFPR, 2005. 86p.

KOSAR, 2015. **BOPP - Homopolymer Grades** (Marun Petrochemical Company). Disponível em: <kosar.co/files/images/homopolymer-signed-1454939954.pdf> Acesso em: 03 de abr. 2016.

LAMBERT, J. et al. 3D damage characterisation and the role of voids in the fatigue of wind turbine blade materials. **Composites Science and Technology**. v. 72, n. 2, p.337-343, 2012.

LEÃO, A. L. et al. Resíduos Agro-Industriais – Plantas fibrosas. Caracterização e utilização. In: BORRÁS, V. A. et al. **Aprovechamiento de residuos agro-industriales como fuente sostenible de materiales de construcción**. Valencia: Editorial de la Universitat Politècnica de València, 2011. cap. 8, p. 171-204.

LEÃO, A. L. **Viabilidade técnica da produção de compósitos não-estruturais à base de lignocelulósicos**. 1997. 144 f. Tese (Livre-docência) - Faculdade de Ciências Agrônomicas, UNESP - Botucatu, 1997.

LEÃO, A. L.; FERRAO, P. C.; SOUZA, S. F. State-of-the-art for extrusion and injection moulding FPC: natural Fibre Plastics Composites in Brazil. **International Journal of Materials & Product Technology**. v. 36, n. 1-4, p. 134-154, 2009.

LEBLANC, J. L. et al. Investigating polypropylene-green coconut fiber composites in the molten and solid states through various techniques. **Journal of Applied Polymer Science**, v. 102, n. 2, p. 1922-1936, 2006.

LIGOWSKI, E.; SANTOS, B.C. DOS; FUJIWARA, S.T. Materiais compósitos a base de fibras da cana-de-açúcar e polímeros reciclados obtidos através da técnica de extrusão. **Polímeros**, v.25, n.1, p.70-75, 2015.

LIMA, T. A. M.; MAGALHÃES, W. L. E. Produção de painéis de pupunha com diferentes tipos de resina. In: ENCONTRO BRASILEIRO EM MADEIRA E ESTRUTURAS DE MADEIRA, 11, 2008, Londrina. **Anais...** Londrina: EBRAMEM, 1 CD-ROM. 2008.

LIU, L. et al. Effects of cure cycles on void content and mechanical properties of composite laminates. **Composite Structures**. V. 73, n. 3, p. 303-309, 2006.

LOPES, R. V. P. **Estudo das propriedades mecânicas de biocompósito de poliéster reforçado por fibra de munguba (Pseudobombaxmunguba)**. 2014, 81f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Industrial). Universidade Federal do Pará – Belém, 2014.

LUZ, S.M. **Estudo das propriedades mecânicas, interface e morfologia de compósitos de polipropileno reforçados com fibras de bagaço e palha de cana**. 2008. 153 f. Tese (Doutorado em Biotecnologia Industrial) – Escola de Engenharia de Lorena, Universidade de São Paulo, Lorena, 2008.

MACEDO, L. B.; et al. Propriedades físicas de painéis aglomerados de madeira produzidos com adição de película de polipropileno biorientado. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. v. 19, p. 674-679, 2015.

MANO, E. B. **Polímeros como materiais de engenharia**. 2. ed. São Paulo: Edgard Blücher, 195 p. 2000.

MARABEZI, K. et al. Determinação de lignina em bagaço e palha de cana-de-açúcar. In: REUNIÃO ANUAL DA SOCIEDADE BRASILEIRA DE QUÍMICA, 32. 2009, **Anais...** Fortaleza, 2009.

MARGEM, J. I. **Estudo das características estruturais e propriedades de compósitos poliméricos reforçados com fibras de malva**. 2013. 134 f. Tese (Doutorado em Engenharia e Ciência dos Materiais) - Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Campos dos Goytacazes/RJ, 2013.

MASSULO, L. A.; RODRIGUEZ, A. A.; MÄHLMANN, C. M. Desenvolvimento de compósitos poliméricos baseados em polipropileno reciclado visando o uso como placas absorvedoras de energia solar. **Revista Jovens Pesquisadores**. Santa Cruz do Sul, v. 6, n. 1, p. 02-14, 2016.

MEDEIROS, E.S., **Desenvolvimento de compósitos de resina fenólica reforçados por tecidos híbridos juta/algodão**. 2002, 117 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) - Universidade Federal de São Carlos, São Carlos-SP, 2002.

MELO, R. R. de. et al. Propriedades físico-mecânicas de painéis aglomerados produzidos com diferentes proporções de madeira e casca de arroz. **Ciência Florestal**. v. 19, n. 4, p. 449-460, 2009.

MIGUEL, P. A. C. et al. Desdobramento da qualidade no desenvolvimento de filmes flexíveis para embalagens. **Polímeros: ciência e Tecnologia**, vol. 13, n. 2, 2003.

MOHANTY, A. K.; MISRA, M.; DRZAL, L. T. Surface modifications of natural fibers and performance of the resulting biocomposites: An overview. **Composite Interfaces**. v. 8, n.5, p. 313-343, 2001.

MONTEIRO, S.N.; ALMEIDA, J.R.M. Ensaios de *Pull out* em fibras lignocelulósicas-uma metodologia de análise. **Revista Matéria**. v. 11, n. 3, p. 189-196, 2006.

MORI, F. A. et al. Utilização de madeiras de *Eucalyptus* e nativas no armazenamento da aguardente de cana de açúcar. In: SEMINÁRIO SUL-MINEIRO DE CACHAÇA DE ALAMBIQUE, 1., 2002, Lavras. **Anais...** Lavras: UFLA, p. 32-32.

MOTHÉ, C. G.; ARAUJO, C. R. Caracterização térmica e mecânica de compósitos de poliuretano com fibras de curauá. **Polímeros: Ciência e Tecnologia**. São Carlos – SP. v. 14, n. 4, p. 274-278, 2004.

MULINARI, D. R.; SILVA, M. L. C. P. Study of the Mechanical Properties of Cellulose/ZrO₂.nH₂O Composites. In: **INTERNATIONAL CONFERENCE ON EXPERIMENTAL MECHANICS**, 13. 2007, Alexandroupolis. Experimental Analysis of Nano and Engineering Materials and Structures. Dordrecht: Springer, v. 1, 2007.

MULLER, R., et al. Obtenção e caracterização de compósitos de polipropileno pós-consumo com fibras de cana-de-açúcar com e sem tratamento químico. In: **Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais**, 17., 2006, Foz do Iguaçu-PR, 2006.

NEIS, M.; MACHADO, L. S. B. Estudo das propriedades mecânicas e térmicas de compósitos de polipropileno com casca de banana. **Revista de Iniciação Científica da Ulbra**. n. 13. p. 232-241, 2015.

NETO, F. L.; PARDINI, L. C. **Compósitos estruturais: Ciência e Tecnologia**. Edgard Blucher, 2006.

OLIVEIRA, R. A. de. **Comportamentos, térmico e mecânico, de compósitos de polipropileno e resíduo da hidrólise enzimática do bagaço de cana de açúcar**. 2014, 132f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica na área de Materiais). Universidade Estadual Paulista - Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2014.

OPAL, 2016. **BOPP: Tenter Frame Flexible Packaging, Overwrap, Metalised** out. 2015. Disponível em: <http://www.opalindia.in/PDF/PP/PP%20Product%20Catalogue_Revised.pdf> Acesso em: 10 de mai. 2016.

OREFICE, R. L., PEREIRA, M. M., MANSUR, H. S. **Biomateriais – Fundamentos & Aplicações**. Editora: Guanabara Koogan. 2012. 538p.

PAIVA, J. M. F. de; FROLLINI, E. Matriz termofixa fenólica em compósitos reforçados com fibras de bagaço de cana-de-açúcar. **Polímeros: Ciência e Tecnologia**. p. 78-87, 1999.

PAPADOPOULOS, A.M. State of the art in thermal insulation materials and aims for future developments. **Energy and Buildings**, v.37, p.77-86, 2005.

PEHANICH, J. L., BLANKENHORN, P. R., SILSBEE, M. R., 2004, “Wood Fiber Surface Treatment Level Effects on Selected Mechanical Properties of Wood Fiber– Cement Composites”, **Cement and Concrete Research**, v. 34, pp. 59-65.

PEREIRA, J. C. **Projeto estrutural com materiais compostos**. Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, Departamento de Engenharia Mecânica, Grupo de Análise e Projeto Mecânico, Apostila. 180 p. 2005.

PEREIRA, M. A. **Confecção de móveis com a madeira de *Coffea arabica* L.** Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia da Madeira) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, p.59, 2008.

PEREIRA, M. A. R.; BERALDO, A. L. **Bambu de corpo e alma**. Bauru: Canal 6, 240 p. 2007.

PITARELO, A. P. **Avaliação da susceptibilidade do bagaço e da palha de cana-de-açúcar à bioconversão via pré-tratamento a vapor e hidrólise enzimática**. 2007. 125 f. Dissertação (Mestrado em Química) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2007.

RAMOS, R. R. F. **Desenvolvimento de compósitos de polipropileno (pp) com sabugo de milho (sm) proveniente de resíduos agrícolas**. 2013. 76f. Dissertação (Mestrado em Ciências e Engenharia de Materiais) - Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2013.

RANA, A.K.; MANDAL, A.; BANDYOPADHYAY, S. Short jute fibers reinforced polypropylene composites: effect of compatibiliser, impact modifier and fiber loading. **Composites Science and Technology**, v.63, p. 801-806, 2003.

RAZERA, I. A. T.; FROLLINI, E. Composites based on jute fibers and phenolic matrices: Properties of fibers and composites. **Journal of Applied Polymer Science**. v. 91, p.1077-1085, 2004.

RIBEIRO, T. R. A. de. **Estudo da utilização de embalagens multifoliadas para produção de painéis**. 1998. 94 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia/Energia na Agricultura) - Faculdade de Ciências Agrônômicas - UNESP, Botucatu, 1998.

RODOLFO Jr., JOHN, V. M. Desenvolvimento de PVC Reforçado com Resíduos de Pinus para Substituir Madeira Convencional em Diversas Aplicações. **Polímeros: Ciência e Tecnologia**, v. 16, n. 1, p. 1-11, 2006.

RODRIGUES, A. **Estudo da compatibilização de compósitos de polipropileno e farinha madeira com polipropileno enxertado com ácido acrílico e anidrido maleico**. 2011. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciência de Materiais) - Universidade Estadual de Ponta Grossa, PR: Ponta Grossa, 2011.

ROSA S. M. L. **Estudo das propriedades de compósitos de polipropileno com casca de arroz**. 2007. 92f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2007.

ROSE, J. Equipment overcomes - some knotty problems. **Modern Plastics**, March, p. 40-41, 2002.

RUCH, J. et al. Transformação direta facilita a moldagem plásticos reforçados com fibras naturais. **Plástico Industrial**, n. 68, p. 44- 63, 2004.

SAHEB, D. N., JOG, J. P. Natural fiber polymer composites: a review. **Advances in Polymer Technology**. v. 18, n. 4, p. 351-363, 1999.

SALAZAR, R. F. S.; SILVA, G. L. P.; SILVA, M. L. C. P. Estudo da composição da palha de milho para posterior utilização como suporte na preparação de compósitos. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA QUÍMICA EM INICIAÇÃO CIENTÍFICA, 6., 2005, Campinas. **Anais...** Campinas: Unicamp, 2005.

SALAZAR, V. L. P.; CARASCHI, J. C.; LEÃO, A. L. Avaliação dos produtos de emissão a partir da pirólise de assentos automotivos feitos de fibra de coco e de espuma de poliuretano. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, Rio de Janeiro, v. 10, n. 2, p. 162-166, 2005.

SANCHEZ, C. G. et al. **Polyester resin composite with sugar cane bagasse: influence of fibers treatment in flexural and tensile strenght and accelerated aging**. In: PPS 2004 Americas Regional Meeting. Florianópolis –SC. Program and proceedings. v. 1, p. 46-47. 2004.

SANSÍGOLO, C.A.; BARREIROS, R.M. Qualidade da madeira de *Pinus caribaea* var. *hondurensis* para produção de celulose kraft. In: CONGRESSO ANUAL DE CELULOSE E PAPEL DA ABTCP, 31., São Paulo, 1998. **Anais...** São Paulo: ABCP, 1998. p.417-429.

SANTOS, A. M.; AMICO, S. C.; SYDENSTRICKER, T. H. D. Desenvolvimento de compósito híbrido polipropileno / fibras de vidro e coco para aplicações de Engenharia. In: CBECIMat - **Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais**. 17. Foz do Iguaçu, PR. p. 3800-3809, 15 a 19 de nov., 2006.

SANTOS, A. S. **Estudo da viabilidade de aplicação de fibras da pupunha (*Bactris gaspaea*) como alternativa à fibra de vidro no desenvolvimento de produtos**. 2007. 98f. Dissertação (Mestrado em Saúde e Meio Ambiente) - Universidade da Região de Joinville. Joinville - SC, 2007.

SANTOS, C.P. et al. Papel: como se fabrica? **Revista Química Nova na Escola**. Sociedade Brasileira de Química, n.14, novembro de 2001.

SCAN-BULK DENSITY. **SCAN-CM 46**: pulp, paper and board. Suécia, 4 p. 1992.

SCHIMIDT, F. et al. Multiaxial fatigue behaviour of GFRP with evenly distributed or accumulated voids monitored by various NDT methodologies. **International Journal of Fatigue**. v. 43, p. 207-216, 2012.

SCHNEIDER, H. P. As tendências mundiais na fabricação de perfis e tubos de PVC. **Plástico Industrial**. p. 72-83, Mar. de 2002.

SGRICCIA, N.; HAWLEY, M. C.; MISRA, M. Characterization of natural fiber surfaces and natural fiber composites. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**. v.39, n. 10, p. 1632-1637, 2008.

SIGMA, PVC (2016). **Forro de PVC**. Disponível em: <<http://www.forrodepvcsigma.com.br/faq>>. Acesso em: 15 out. 2016.

SILVA, L. B. da. **Emprego de adsorventes oriundos da casca de arroz na remoção de cobre em efluentes aquosos**. 2013. 110 p. Dissertação (Mestrado em Química) - Universidade Federal da Bahia, Instituto de Química, 2013.

SILVA, P. R. N. da; GOLÇALVES, G. R.; FREITAS, J. C. C. Preparação, Caracterização e Avaliação na Gaseificação de Celuligninas de Bagaço de Cana e Casca de Arroz: Caso de Reaproveitamento de Resíduos Lignocelulósicos. **Revista Virtual de Química**. 2016.

SOU ECOLÓGICO. **Você sabia que as embalagens de batatas chips são recicláveis?** 2014. Disponível em: <<http://www.souecologico.com.br/noticia.php?id=2682>> Acesso em: 7 abr. 2015.

STARK, N. M. Wood fiber derived from scrap pallets used in polypropylene composites. **Forest Products Journal**, v. 49, n. 6, p. 39-46, Jun. 1999.

STARK, N.; SCHENEIDER, J. P. **Waste-wood-derived fillers for plastics**. Madison: USDA, Forest Product Laboratory, 1996. General Technical Report FPL-GTR-91.

TAPPI – TECHNICAL ASSOCIATION OF THE PULP AND PAPER INDUSTRY. Test methods 1998-1999. Atlanta, TAPPI, (CD-ROM). 573p. 1999.

TECNOLOGIA PRODUZ MADEIRA PLÁSTICA. **Plástico Moderno**, n. 315, 2000. Disponível em <http://www.plastico.com.br/revista/pm315/extrusoras4.htm>. Acesso em Novembro de 2004.

TEIXEIRA, M. G. **Aplicação de conceitos da ecologia industrial para a produção de materiais ecológicos: o exemplo do resíduo de madeira**. 2005, 159 f. Dissertação (Mestrado em Gerenciamento e Tecnologias Ambientais no Processo Produtivo). Universidade Federal da Bahia. Escola Politécnica. Salvador, 2005.

TRUGILHO, P. F.; LIMA, J. T.; MORI, F. A. Correlação canônica das características químicas e físicas de clones de *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus saligna*. **Cerne**, Lavras, v. 9, n. 1, p. 66-80, 2003.

WISEWASTE. **Pallets fabricados a partir de resina produzida com BOPP**. Disponível em: <<http://www.wisewaste.com.br/cases/pallets-fabricados-a-partir-de-resina-produzida-com-bopp/>> Acesso em: 22 jul. 2015.

YAM, K. L. et al. Composites from compounding wood fibers with recycled high density polyethylene. **Polymer Engineering & Science**. v. 30, n. 11, p. 693-699, 1990.

YIMSAMERJIT, P. et. al.; Mechanical and physical properties of green particle board produce from corncob and starch binder composite. **International Conference on Engineering and Environment**, ICEE2007106-349, 2007.

YOUNG, H. D. Thermal Conductivity. In: SEARS, F. W.; YOUNG, H. D.; ZEMANSKY M. W. **University Physics**. Seventh Edition. 1987.

YOUNGQUIST, J. A. et al. **Literature review on use of nonwood plant fibers for building materials and panels**. Madison: Forest Products Laboratory, 146 p. 1994.

YOUNGQUIST, J. A. Wood-based composites and panel products. In: **Wood handbook: wood as an engineering material**. Madison: USDA Forest Service, Department of Agriculture, Forest Products Laboratory. Chap. 10, 463 p. 1999.

ZHANG, A.; LI, D.; LU, H. & ZHANG, D. Qualitative separation of the effect of voids on the bending fatigue performance of hygrothermal conditioned carbon/epoxy composites. **Materials Design**, v. 32, p.4803 (2011).

ZHOU, X.Y. et al. An environment-friendly thermal insulation material from cotton stalk fibers. **Energy and Buildings**, v.42, p.1070-1074, 2010.

ZUCCO, L.L e BERALDO, A.L. Efeito da adição de cinza da casca de arroz em misturas cimento-casca de arroz. **Engenharia Agrícola**. Jaboticabal, v.28, n.2, p.217-226, 2008.