

CENTRO UNIVERSITÁRIO FEI  
GUSTAVO LUIZ BUENO CARDOSO

**AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES E APLICAÇÕES DE COMPÓSITOS  
NATURAIS DE MATRIZ POLIMÉRICA CONTENDO BORRA DE CAFÉ**

São Bernardo do Campo

2021

GUSTAVO LUIZ BUENO CARDOSO

**AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES E APLICAÇÕES DE COMPÓSITOS  
NATURAIS DE MATRIZ POLIMÉRICA CONTENDO BORRA DE CAFÉ**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Centro Universitário FEI, como parte dos requisitos necessários para obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Materiais. Orientado pelo Prof. Dr. Baltus Cornelius Bonse.

São Bernardo do Campo

2021

Bueno Cardoso, Gustavo Luiz.

AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES E APLICAÇÕES  
DE COMPÓSITOS NATURAIS DE MATRIZ  
POLIMÉRICA CONTENDO

BORRA DE CAFÉ / Gustavo Luiz Bueno Cardoso. São  
Bernardo do Campo, 2021.

67 f.

Trabalho de Conclusão de Curso - Centro  
Universitário FEI. Orientador: Prof. Dr. Baltus  
Cornelius Bonse.

GUSTAVO LUIZ BUENO CARDOSO

**AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES E APLICAÇÕES DE COMPÓSITOS  
NATURAIS DE MATRIZ POLIMÉRICA CONTENDO BORRA DE CAFÉ**

Trabalho de Conclusão de Curso, apresentado  
ao Centro Universitário FEI, como parte dos  
requisitos necessários para obtenção do título  
de Bacharel em Engenharia de Materiais.

Comissão julgadora

---

Baltus Cornelius Bonse

---

Adriana M. Catelli de Souza

---

Rafael Galdino Bringel

São Bernardo do Campo

15/06/2021

Aos meus pais, José Luis Cardoso e Silvia Domingues Bueno, minha irmã Jéssica Aparecida Cardoso e ao meu orientador Baltus Cornelius Bonse.

## AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus por me tornar quem eu sou e me dar forças para minhas conquistas.

Aos meus pais, José Luís Cardoso e Silvia Domingues Bueno por toda criação e apoio que tive deles nos melhores e piores momentos.

Jéssica Aparecida Cardoso, minha irmã mais velha, meu cunhado André Leonardo Francisco do Nascimento e minha sobrinha Isis Cardoso Nascimento.

Em especial ao meu orientador Baltus Cornelius Bonse por toda sua paciência e apoio durante todo o trabalho.

Aos professores Jorge Kolososki, Gilberto J. Pereira, Patrícia Schmid Calvão, Adriana M. Catelli de Souza, Francisco Lameiras Júnior,

À Isabella Pereira Dionísio por todo apoio e carinho que me deu durante essa trajetória.

Aos meus grandes amigos Leonardo Mendes Sinibaldi, Rafael dos Anjos Toreson e Paulo Alcidori Filho.

Aos técnicos de laboratório por toda ajuda.

Aos meus colegas de classe, Renata Carolina Mota Santos, Rayanne Araújo Andrade, Jefferson Silva Pereira dos Santos, Suellen Cristina dos Reis e Pierina Alice Fracasso por esses 3 anos.

Aos meus companheiros de MaveKo Team por todos os títulos, resenha e paciência nos meses em que estive ausente para estudar.

Aos meus professores que tanto apoiaram e tiveram paciência comigo.

Aos meus amigos que sempre estiveram comigo nestes momentos.

“‘Time changes everything’. That’s what people say, it’s not true. Doing things changes things. Not doing things leaves things exactly as they were.”

Gregory House

## RESUMO

Por ser um grande consumidor de café torrado e moído, o Brasil produz grande quantidade de borra de café, que normalmente é descartada em lixões e aterros sanitários. Com a crescente preocupação mundial de agregar cada vez mais valor a resíduos, incluindo alimentares, estudos com ênfase em reaproveitamento e usos alternativos de borra de café (BC) são cada vez mais necessários. Alguns destes usos passam pela incorporação da borra de café em matrizes termoplásticas, como o polipropileno. Neste trabalho é estudado o efeito da incorporação em polipropileno de 10%, 20%, 30% e 40% em massa de BC, com agente compatibilizante de PP enxertado com anidrido maleico (PP-g-MA) a um teor de 10% em relação à massa do resíduo, utilizando pré-mistura, por tamboreamento, de todos os componentes e extrusão subsequente em extrusora dupla rosca corrotacional. Além disso, preparou-se uma amostra com 20% BC e 20% de compatibilizante em relação à massa de BC. De forma geral, a incorporação da borra de café no PP trouxe um aumento da rigidez quando comparável ao PP puro, mas houve uma queda na resistência à tração e no alongamento, indicando que a BC atuou mais como carga de enchimento do que como reforço. Baixos teores de BC (10% e 20%) praticamente não afetaram a resistência ao impacto, porém para teores maiores (30% e 40%) esta propriedade foi reduzida. A temperatura de distorção ao calor (HDT) e o índice de fluidez reduziram 38%, sendo que não houve variação com o aumento no teor de BC. A análise de MEV mostrou que o aumento no teor de PP-g-MA aumentou o molhamento entre matriz e carga, porém este aumento não afetou muito as propriedades mecânicas. A análise usando o software Granta EduPack mostrou que o composto de PP-10%BC possui semelhanças com compostos de fibra de kenaf e PP homopolímero e copolímero randômico. A viabilidade da aplicação do compósito deste trabalho se mostrou plausível em aplicações não estruturais e com restrição a ambientes internos, principalmente em ambientes correlacionados com a borra de café, como cafeterias ou restaurantes.

Palavras-chave: Compósitos; Borra de café; Polipropileno; Compósitos naturais.

## ABSTRACT

As a major consumer of roasted ground coffee, Brazil produces a large amount of spent coffee grounds (SCG), which is normally discarded in dumps and landfills. With the growing global concern to add more and more value to waste, including food waste, studies focusing on the reuse and alternative uses of SCG are increasingly needed. Some of these alternative uses include the incorporation of SCG in thermoplastics matrices, like polypropylene (PP). This study deals with the incorporation of SCG in polypropylene, containing 10%, 20%, 30%, and 40 wt% SCG, along with compatibilizer maleic anhydride grafted PP (PP-g-MA) at 10%wt in relation to SCG mass. Components were tumble-mixed and extruded in a corotating twin-screw extruder ( $L/D = 25$ ,  $L = 16$  mm) and subsequently, injection molded. In addition, a sample containing 20 wt% SCG and 4%wt PP-g-MA was prepared. In general, the SCG incorporation, in comparison with neat PP, resulted in a gain in stiffness, but a loss in the strain at break and tensile strength, which indicates SCG functioned rather as a filler than a reinforcement. Low percentages of SCG (10% and 20%) did not affect the impact strength, but higher contents reduced this property. Scanning electronic microscopy analysis evidenced increase in PP-g-MA increased wetting between matrix and SCG, however, this increase did not affect much the mechanical properties. Analysis using Granta EduPack software showed PP-10%BC could be compared with PP-10% kenaf fiber, PP homopolymer, and PP random copolymer. PP-10%BC might be feasible in internal uses, mainly in coffee-related settings, like coffee shops or restaurants.

Keywords: Composites; Spent coffee grounds; Polypropylene; Natural composites.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Borra de café.....	15
Figura 2 - Principais resinas consumidas no Brasil (%) (2019).....	17
Figura 3 - Mero do Polipropileno (PP) e seu símbolo de reciclagem.....	18
Figura 4 - Representação esquemática dos homopolímeros e copolímeros de PP.....	18
Figura 5 - Micrografias da superfície fraturada em ensaio de tração de compósitos de PP reforçado com fibra natural: (a) sem e (b) com agente compatibilizante.....	23
Figura 6 - Micrografias de MEV mostrando a distribuição e adesão de SCG ou TSCG em compósitos (a) PLA/SCG (20% em massa) e (b) PLA-g-MA/TSCG (20% em massa). ....	24
Figura 7 - Micrografias de MEV de BC tratada com NaOH 1% por: (a) 0 h, (b) 1 h, (c) 6 h, (d) 12 h, (e) 24 h. ....	25
Figura 8 - Micrografias de MEV mostrando a aparência da superfície de borra de café tratada com NaOH 0,5 N: (A) a 50 °C por 6 h; (B) a 60 °C por 6 h; (C) a 70 °C por 6 h; (D) 80 °C por 6 h; (E) a 110 °C por 15 min; (F) a 121 °C por 30 min; (G) não tratado. ....	25
Figura 9 - Extrusora Thermo Scientific com calha de água e granulador. ....	27
Figura 10 - Injetora Battenfeld utilizada para obtenção dos corpos de prova. ....	28
Figura 11 - Máquina Universal de Ensaio Instron com acessórios para ensaio de tração. ....	30
Figura 12 - Acessório para flexão em 3 pontos. ....	31
Figura 13 - Esquema de impacto em um corpo de prova de ensaio Charpy. ....	32
Figura 14 - Pêndulo para ensaio de impacto Charpy.....	32
Figura 15 - Esquema de um plastômetro de extrusão.....	33
Figura 16 - Equipamento para ensaio de índice de fluidez CEAST-Italy. ....	33
Figura 17 - Equipamento HDT-VICAT da CEAST-Italy utilizado no ensaio HDT.....	34
Figura 18 - Corpos de prova de PP-BC. ....	36
Figura 19 - Micrografias com aumento de 40x referentes à composição: a) 20% BC e 2% PP-g-MA e b) 20% BC e 4% PP-g-MA. ....	37
Figura 20 - Micrografias referentes à composição: a) 20% BC e 2% PP-g-MA e b) 20% BC e 4% PP-g-MA. ....	37
Figura 21 - Resultados de módulo de elasticidade à tração.....	38
Figura 22 - Resultados de resistência à tração.....	39
Figura 23 - Resultados de deformação na ruptura. ....	40
Figura 24 - Resultados do módulo de elasticidade à flexão. ....	42
Figura 25 - Resultados de resistência à flexão. ....	43

Figura 26 - Resultados de resistência ao impacto Charpy.....	44
Figura 27 - Resultados de índice de fluidez. ....	45
Figura 28 - Resultados de HDT.....	47
Figura 29 - Comparativo do módulo de elasticidade à tração para compósitos naturais. ....	49
Figura 30 - Comparativo do Tensão de Ruptura à Tração (ou Resistência à tração) para compósitos naturais. ....	49
Figura 31 - Comparativo do módulo de elasticidade à flexão para compósitos naturais. ....	50
Figura 32 - Comparativo do módulo de elasticidade à tração para polímeros termoplásticos. ....	51
Figura 33 - Comparativo do Tensão de Ruptura à Tração (ou Resistência à tração) para termoplásticos.....	52
Figura 34 - Comparativo do módulo de elasticidade à flexão para termoplásticos.....	52
Figura 35 - Kit de mesa e cadeira de plástico.....	53

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Principais propriedades do PP em relação a algumas resinas .....	19
Tabela 2 - Comparativo das vantagens e desvantagens de vários termoplásticos usuais em relação ao PP. ....	20
Tabela 3 - Condições de extrusão do <i>masterbatch</i> PP-BC.....	27
Tabela 4 - Condições de injeção dos corpos de prova.....	28
Tabela 5 - Resultados de módulo de elasticidade à tração. ....	38
Tabela 6 - Resultados de resistência à tração. ....	39
Tabela 7 - Resultados de deformação na ruptura. ....	40
Tabela 8 - Resultados de módulo de elasticidade à flexão. ....	41
Tabela 9 - Resultados de resistência à flexão. ....	42
Tabela 10 - Resultados de resistência ao impacto Charpy. ....	44
Tabela 11 - Resultados de índice de fluidez. ....	45
Tabela 12 - Resultados de HDT. ....	46
Tabela 13 - Propriedades do PP-10%BC para análise.....	48
Tabela 14 - Análise ANOVA para módulo de elasticidade à tração. ....	63
Tabela 15 - Análise ANOVA para resistência à tração. ....	63
Tabela 16 – Análise ANOVA para deformação na ruptura para ensaio de tração.....	64
Tabela 17 - Análise ANOVA para módulo de elasticidade à flexão. ....	64
Tabela 18 - Análise ANOVA para resistência à flexão. ....	65
Tabela 19 - Análise ANOVA para resistência ao impacto Charpy. ....	66
Tabela 20 - Análise ANOVA para índice de fluidez.....	66
Tabela 21 - Análise ANOVA para ensaio de HDT. ....	67

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>14</b>
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>15</b>
2.1	BORRA DE CAFÉ .....	15
2.2	REAPROVEITAMENTO DA BORRA DE CAFÉ.....	15
2.3	POLIPROPILENO .....	17
2.4	PP HOMOPOLÍMERO E APLICAÇÕES.....	18
2.5	PP COM CARGAS NATURAIS .....	20
2.6	INTERAÇÃO MATRIZ E CARGA .....	22
<b>2.6.1</b>	<b>Agentes de acoplagem e compatibilizantes .....</b>	<b>22</b>
<b>2.6.2</b>	<b>Outros tratamentos superficiais das cargas naturais .....</b>	<b>24</b>
<b>3</b>	<b>MATERIAIS E METODOLOGIA.....</b>	<b>26</b>
3.1	MATERIAIS .....	26
3.2	PROCESSAMENTO DA MISTURA E ENSAIOS .....	26
<b>3.2.1</b>	<b>Extrusão .....</b>	<b>26</b>
<b>3.2.2</b>	<b>Injeção .....</b>	<b>27</b>
<b>3.2.3</b>	<b>Ensaio de tração .....</b>	<b>29</b>
<b>3.2.4</b>	<b>Ensaio de flexão em três pontos .....</b>	<b>30</b>
<b>3.2.5</b>	<b>Ensaio de Impacto Charpy .....</b>	<b>31</b>
<b>3.2.6</b>	<b>Ensaio de índice de fluidez (IF).....</b>	<b>32</b>
<b>3.2.7</b>	<b>Temperatura de deflexão térmica (HDT) .....</b>	<b>33</b>
<b>3.2.8</b>	<b>Simulação em Granta EduPack.....</b>	<b>34</b>
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E ANÁLISE .....</b>	<b>36</b>
4.1	ANÁLISE DE MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA.....	36
4.2	ENSAIO DE TRAÇÃO .....	38
4.3	ENSAIO DE FLEXÃO .....	41
4.4	ENSAIO DE IMPACTO CHARPY.....	43
4.5	ENSAIO DE ÍNDICE DE FLUIDEZ .....	45
4.6	ENSAIO DE HDT.....	46
4.7	SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL GRANTAEDUPACK.....	47
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES .....</b>	<b>55</b>
	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>57</b>
	<b>APÊNDICE A – Análise de ANOVA para os ensaios .....</b>	<b>63</b>

## 1 INTRODUÇÃO

As sociedades modernas estão enfrentando a difícil tarefa de aumentar a produtividade, para o progresso econômico de longo prazo, sem esgotar recursos preciosos ou ter um impacto prejudicial no meio ambiente. Por isso, está cada vez mais se falando da importância de sustentabilidade e economia circular, para substituir o modelo econômico global atual, essencialmente linear, de extrair, fabricar, consumir, jogar fora (WINANS, 2017).

Um dos focos da sustentabilidade e da economia circular é entender como os resíduos tradicionais podem ser usados em outro lugar, seja reintroduzidos no processo de produção do produto que gerou os resíduos ou na produção de outro produto. De uma perspectiva de economia circular, “desperdício é um recurso no lugar errado”. A recuperação de recursos é uma parte fundamental para tornar uma economia circular (BERNSTEIN, 2016).

Assim, cada vez mais são realizados estudos para reaproveitar vários tipos de resíduos, incluindo alimentares, agregando também valor a estes resíduos. Um resíduo alimentar gerado em grande quantidade no Brasil, por ser importante consumidor de café torrado e moído, é a borra de café (BC), que normalmente é descartada em lixões e aterros sanitários. Dentro do contexto da sustentabilidade, estudos com ênfase em seu reaproveitamento e usos alternativos são cada vez mais necessários. Alguns deste usos passam pela incorporação da BC em matrizes termoplásticas, como o polipropileno.

Este trabalho teve como objetivo principal o estudo das propriedades mecânicas, térmicas e termo-mecânicas influenciadas pela incorporação da borra de café em uma matriz de polipropileno. Além disso, comparações de propriedades foram feitas por meio de simulação computacional, identificando polímeros e compósitos similares, correlacionando as aplicações deste e identificando a viabilidade da substituição dos materiais encontrados pelo compósito de PP-BC. Como objetivos paralelos tem-se o estudo da viabilidade e aplicação da adição da BC em um dos polímeros commodities de maior consumo mundial (PP), bem como a contribuição de pesquisa e desenvolvimento de biocompósitos provenientes de matéria de descarte.

Os compostos de PP com BC foram obtidos por pré-mistura por tamboreamento manual, seguida por mistura em extrusora de dupla rosca corrotacional e, para conformação, injeção da mistura final, com corpos de prova (CP) ensaiados em ensaios mecânicos e térmicos.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo possui como objetivo apresentar os materiais envolvidos neste trabalho, sua estrutura, propriedades e aplicações, assim conceitos importantes e uma revisão de trabalhos recentemente desenvolvidos.

### 2.1 BORRA DE CAFÉ

O consumo brasileiro de café, excluindo bebidas prontas para beber, ultrapassou a marca de 1,3 milhão de toneladas. O café torrado e moído é de grande consumo do brasileiro, com cerca de 80% de toda a venda do produto no mercado nacional. Esse tipo de café, quando produzido gera a borra de café (Figura 1), resíduo que é normalmente descartado em lixões ou aterros sanitários (GLOBORURAL, 2018 e ABIC, 2020).

Segundo Benicá (2019), os principais constituintes da borra de café são os carboidratos (principalmente celulose e a hemicelulose), incluindo as fibras, representando mais da metade de toda composição. Mussatto et al. (2011) encontraram como os constituintes de maior relevância na borra de café os polissacarídeos hemicelulose (37%), celulose (9%), galactanos (14%), e mananos (21%), além de proteínas (14%).

Figura 1 - Borra de café.



Fonte: Green Optimistic, 2015

### 2.2 REAPROVEITAMENTO DA BORRA DE CAFÉ

Algumas iniciativas têm reaproveitado a borra de café para usos alternativos, sendo utilizada como abrasivos leves (esfoliação da pele ou limpeza das mãos), limpeza de fuligem ou até mesmo para formulação de tintas GreenMe (2019) e corantes para tingir roupa (HONG, 2018).

Outros estudos têm reaproveitado a borra de café para uso em matéria-prima de biocombustíveis (Kondamudi *et al.*, 2008; Atabani *et al.*, 2018), carvão ativado para armazenar gases antropogênicos de processos industriais (Kemp *et al.*, 2015), briquetes de carvão (Bryman, 2015), enchimento em aterros rodoviários (Arulrajah *et al.*, 2014), e como base para obter ácido láctico (Kopp *et al.*, 2018), precursor do polímero biodegradável poli(ácido láctico), PLA. Além disso, óleo extraído da borra de café foi usado para aumentar a tenacidade de filamentos de PLA usado em impressão 3D (CHANG *et al.*, 2019).

Vale ressaltar também algumas iniciativas no Brasil para o reaproveitamento da borra de café, como a da Braskem em parceria com a Starbucks® Brasil: trata-se de um projeto-piloto que utiliza o Plástico Verde I'm greenT, copos de plástico reciclados e borra de café para a fabricação de cestos de lixo para lojas selecionadas (Braskem, 2015). Outra é da startup Recoffee que produz biojoias (semijoias com componente biológico, neste caso, a borra de café), objetos de decoração e revestimentos para paredes, usando com matriz uma resina vegetal (CONEXÃO PLANETA, 2018).

O uso de borra de café (BC) como carga de enchimento e/ou reforço em matriz polimérica foi realizado por alguns autores como Baek, Park e Li (2013) e Wu (2015), que fizeram a mistura da BC com matriz PLA. Para melhorar a adesão entre a matriz e a BC enxertaram o PLA com anidrido maléico (MA) e fizeram um tratamento superficial da BC com silano. Testes mecânicos indicaram a melhora da adesão entre a BC tratada e o PLA-g-MA em relação ao PLA/BC. Observaram redução nas temperaturas de fusão dos compósitos com o aumento do teor de BC, e uma melhora na processabilidade dos compósitos PLA-g-MA/BC tratado, devido aos torques de mistura mais baixas. A TG de PLA-g-MA/BC tratado foi maior do que a de PLA/BC, indicando movimento molecular mais restrito. A resistência à água do PLA-g-MA/BC tratado foi maior do que a do PLA/BC. Observaram também que o grau de biodegradação aumentou com o aumento do teor de BC, tanto tratada como não tratada.

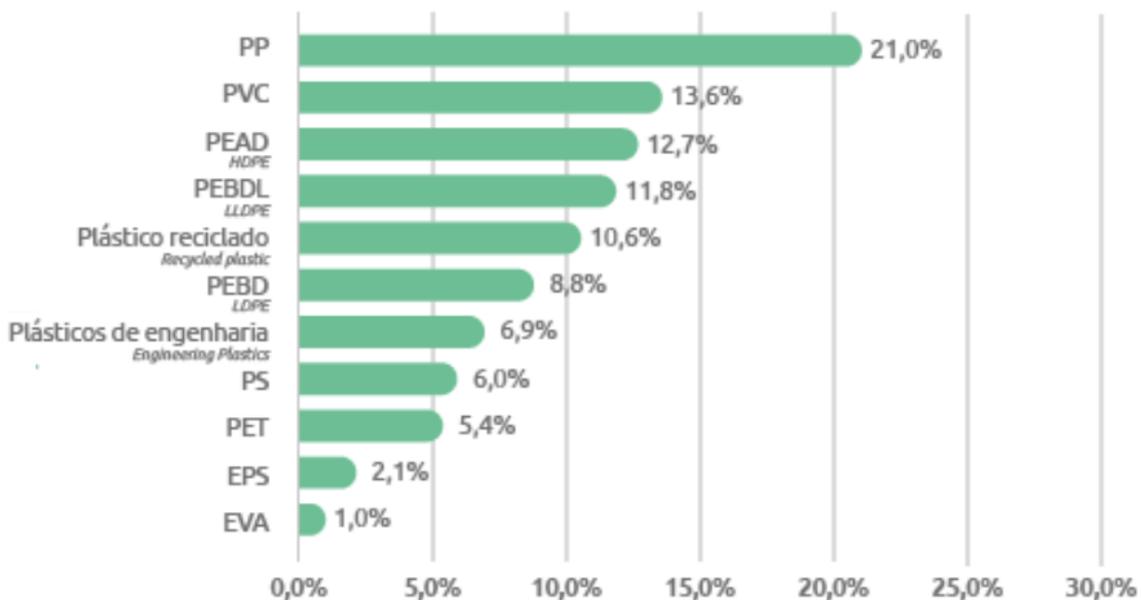
Tan *et al.* (2017) avaliaram o tratamento alcalino e o teor da BC nas propriedades físicas, térmicas e mecânicas de biocompósitos de polietileno de alta densidade (HDPE) oxibiodegradável contendo BC. Observaram que o tratamento resultou em propriedades mecânicas e térmicas melhores para os compósitos. Teores de 10% e de 15% em volume de BC resultaram, respectivamente, em otimização das propriedades de tração e de impacto.

Concluíram que este tipo de compósito tem potencial para aplicações na indústria automotiva, de embalagens e de móveis leves.

### 2.3 POLIPROPILENO

O polipropileno (PP), utilizado como matriz no presente trabalho, está entre os polímeros mais usados na indústria, já que este é um *commodity* de ampla aplicação, podendo ser utilizado desde potes para alimentos até coletes protetores para esportes radicais. Os diversos tipos de polipropileno disponibilizados pela indústria petroquímica, tais como PP homopolímero, PP copolímero heterofásico e o PP copolímero randômico, fortalecem o amplo uso deste. Segundo a ABIPLAST (2019), no ano de 2019 o consumo de PP foi o maior entre os plásticos, 21%, conforme observado pela Figura 2 a seguir.

Figura 2 - Principais resinas consumidas no Brasil (%) (2019).



Fonte: Autor “adaptado de” ABIPLAST perfil 2019

Proveniente da polimerização do gás propeno, o homopolímero é um termoplástico da classe das poliolefinas, reciclável e dotado de grande importância industrial.

A Figura 3 mostra o mero do polipropileno e o seu símbolo de reciclagem, este muito utilizado na triagem manual destes materiais, que facilita o processo de separação.



As vantagens do PP homopolímero em relação a outros polímeros da classe das *commodities* se dá pela sua elevada rigidez, baixa densidade (0,905 g/cm<sup>3</sup>) e resistência térmica em comparação aos polietilenos de alta e baixa densidade. Possui boa resistência à fadiga e a trincas, porém baixa resistência ao impacto em baixas temperaturas. Outras características importantes deste polímero são temperatura de transição vítrea (T<sub>g</sub>) em torno de -20 °C, temperatura de fusão cristalina na casa dos 165 °C, além de baixo custo e alta resistência química a vários solventes. As propriedades do material podem variar de acordo com a massa molar média e sua distribuição (INÁCIO, 2014; MAIER; CALAFUT, 1998; FIRMINO, 201).

As tabelas 1 e 2 apresentam uma comparação das propriedades do PP homopolímero (apenas PP na tabela) com as de outros polímeros.

Tabela 1 - Principais propriedades do PP em relação a algumas resinas

Propriedades	Unidades	PP (*)	LDPE	HDPE	HIPS	PVC	ABS
Módulo de Flexão	(GPa)	1.5	0.3	1.3	2.1	3.0	2.7
Resistência a Tração	(MPa)	33	10	32	42	51	47
Densidade Específica		0.905	0.92	0.96	1.08	1.4	1.05
Modulo Especifico	(GPa)	1.66	0.33	1.35	1.94	2.14	2.57
HDT a 0.45 MPa.(°C)	(°C)	105	50	75	85	70	98
Temperatura máxima utilização continua	(°C)	100	50	55	50	50	70

\*Dados considerando PP sem modificações

Fonte: Autor “adaptado de” Inácio, 2014 e Tripathi, 2002

Pode-se também comparar as vantagens do PP homopolímero a outros polímeros, conforme a tabela 2.

Tabela 2 - Comparativo das vantagens e desvantagens de vários termoplásticos usuais em relação ao PP.

Polímero	Vantagens	Desvantagens
LDPE (Polietileno de baixa densidade)	Alta resistência ao impacto Não se torna frágil à baixa temperatura	Baixo limite de resistência e dureza Baixa dureza superficial Baixo ponto de deflexão à temperatura
HDPE (Polietileno de alta densidade)	Baixo custo Elevada resistência ao Impacto Não se torna frágil à baixa temperatura	Baixo limite de resistência e dureza Baixa dureza superficial Baixo ponto de deflexão à temperatura
PET	Elevada transparência Boa ação de barreira ao oxigênio Boa resistência ao impacto	Custo elevado Inadequado para temperaturas elevadas
ABS	Boa resistência Bom Brilho Melhor processabilidade	Alto custo e peso Baixa resistência a solventes Baixa resistência ao calor
PA6; P66	Alta resistência	Elevada absorção de água Elevado custo e densidade
PC	Boa transparência Alta resistência e módulo Elevada resistência ao uso contínuo	Elevado custo e densidade Baixa resistência à fadiga

Fonte: Autor “adaptado de” Inácio, 2014 e Balow, 2003

## 2.5 PP COM CARGAS NATURAIS

Muitos compostos contendo cargas naturais, tem o PP como matriz. O principal motivo se dá por ser um material *commodity* com boas propriedades específicas, fácil processamento e de grande uso e, caso a incorporação de cargas naturais tenha resultados positivos, pode-se aproveitar uma quantidade elevada de resíduos em produtos com tal polímero.

Vários estudos incorporaram resíduos vegetais em PP tal como pó de serra (Bettini *et al.*, 2010), fibra de coco (Bettini *et al.*, 2015), farelo de trigo (Leibel e Bonse, 2011), fibra de bambu (Bonse *et al.*, 2010), bagaço de cana (Bonse *et al.*, 2012) etc. Alguns resultados de outros trabalhos similares são apresentados a seguir.

Cerqueira *et al.* (2011) estudaram o compósito de PP com a incorporação de fibra de bagaço de cana pré-aquecido, em composições de 5% a 20% em massa misturado em misturador termocinético. As propriedades de resistência à tração, resistência ao impacto e resistência à flexão sofreram um leve aumento comparado ao polímero virgem.

Haydar *et al.* (2013) reportaram o estudo de fibra de coco não tratada, tratada com silano-alcálico e tratamento alcálico incorporada em matriz de PP para moldagem por

compressão. A fibra de coco utilizada foi de 10%, 20%, 30% e 40% em massa, resultando em um aumento do módulo de tração e resistência à tração, além do aumento da absorção de água para a composição com tratamento de silano-alcálico.

Shivanand *et al.* (2010) utilizaram a fibra de cânhamo em PP para análise de processamento. A conclusão deste autor, além da redução do custo do material por ter carga de enchimento de menor custo, se deu com base na manutenção dos equipamentos de processamento, pois a abrasão dos equipamentos com a incorporação da fibra foi reduzida.

Essabir *et al.* (2013) trabalharam com a incorporação de casca de noz e um agente compatibilizante de estireno-butadieno ao PP. Os resultados mostraram que houve um aumento de resistência mecânica do material, porém redução da estabilidade térmica.

Quanto à carga natural borra de café (BC) em matriz de PP, como no presente trabalho, pode ser citado o trabalho de García-García e colaboradores (2015). Utilizaram 20% em massa de BC para o estudo do comportamento do compósito verde. Investigaram o efeito de um tratamento de superfície hidrofóbico da BC com cloreto de palmitoíla e compararam com tratamentos convencionais, como a silanização e o uso de compatibilizantes (PP-g-MA) em termos de propriedades mecânicas, morfológicas e térmicas, bem como dos efeitos na absorção de água dos compósitos. A mistura do compósito ocorreu por meio de extrusora dupla rosca corrotacional e, posteriormente, moldagem por injeção. Os diferentes efeitos mecânicos de processamento e composição foram estudados por ensaios de flexão e impacto, além de análise térmica mecânica dinâmica (DMTA-torção). Os efeitos térmicos foram obtidos por meio de calorimetria exploratória diferencial (DSC) e análise termogravimétrica (TGA), que revelaram o efeito estabilizador da BC. Como materiais vegetais possuem grande tendência a absorção de umidade, o tratamento de hidrofobização foi testado como uma forma de evitar tal problema, trazendo uma redução considerável na absorção de água. Os resultados mostraram um pequeno aumento do módulo de flexão tanto para compósitos com a BC não-tratado quanto para o tratado/compatibilizado, além do aumento na resistência à flexão. O efeito estabilizante da BC já citado foi evidenciado com um aumento de cerca de 8% na temperatura de início de degradação do compósito quando comparado ao PP puro. A análise de fratura por microscopia eletrônica de varredura (MEV) mostrou uma melhor dispersão dos aditivos e carga para compósitos na qual houve o tratamento com cloreto de palmitoíla.

Assim, resultado comum dos estudos de borra de café (BC) como carga de enchimento e/ou reforço em matriz polimérica foi de um aumento considerável de rigidez, além da redução de deformação na ruptura. Quanto à resposta térmica do material, foi observado que a incorporação da borra de café no PP trouxe um aumento na estabilidade térmica do material.

## 2.6 INTERAÇÃO MATRIZ E CARGA

Visando a melhoria das propriedades mecânicas de um polímero, são adicionadas cargas de reforço, podendo ser na forma de fibras e/ou partículas. Considerando que a distribuição de esforços e/ou tensões em uma matriz polimérica é uniforme em todos os seus pontos, a presença de uma segunda fase dispersa nesta matriz também sentirá a solicitação aplicada no conjunto (CANEVAROLO, 2006).

Durante a dispersão das tensões, a interação matriz *versus* carga é essencial. Caso a carga não tenha boa interação com a matriz, a carga pode ser arrancada da matriz antes mesmo da fratura da matriz polimérica, assim há a necessidade de usar agentes compatibilizantes ou tratamentos que modificam características físicas e químicas da superfície da carga. Alguns destes tratamentos aumentam a rugosidade da carga, causando melhor ancoramento na matriz (BETTINI, 2015; MORANDIM-GIANNETTI, 2017).

### 2.6.1 Agentes de acoplagem e compatibilizantes

Frequentemente os termos agente de acoplagem e compatibilizante são usados como sinônimos, porém alguns autores como Pritchard (2005) fazem uma distinção, sendo agente de acoplagem aplicado a substâncias que melhoram a adesão entre duas superfícies, uma das quais é inorgânica (como fibra de vidro e cargas minerais), enquanto o agente compatibilizante é mais frequentemente usado para descrever aditivos que melhoram a compatibilidade entre dois polímeros orgânicos.

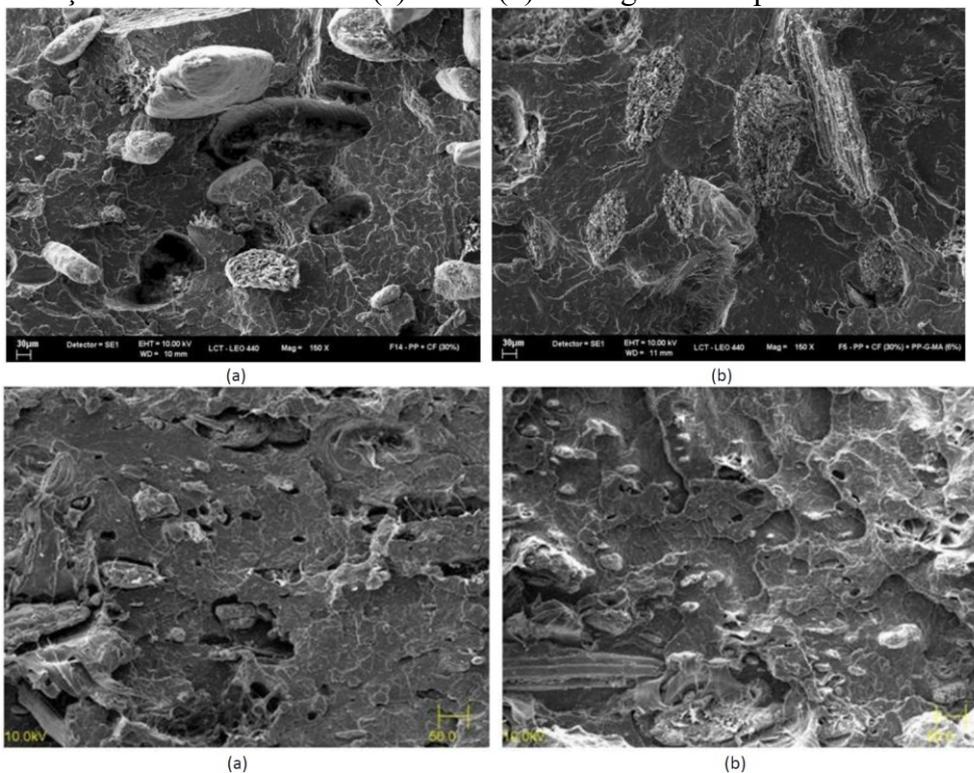
Basicamente, agentes compatibilizantes são copolímeros em bloco ou enxertados, usados para melhorar as propriedades de blendas poliméricas incompatíveis e compatibilizar polímeros com cargas diversas, como de madeira ou minerais. Uma sequência de meros do copolímero terá afinidade com a matriz, enquanto a outra sequência terá afinidade com a fase dispersa. Numa blenda de dois polímeros imiscíveis o agente compatibilizante pode atuar como surfactante sólido e assim reduzir o coeficiente de tensão interfacial, reduzindo o tamanho das partículas de um polímero disperso no outro, melhorando assim a sua dispersão e homogeneidade. No caso de polímero e carga, haverá a melhora na adesão entre a matriz e a carga (PRITCHARD, 2005).

Bonse *et al.* (2010) constataram que a diferença em polaridade entre o PP e a fibra natural resulta em compósitos incompatíveis que não servem para ser utilizados em peças

estruturais. Devido a este fator, foi necessário o uso de compatibilizantes, como é o caso do PP-g-MA, utilizado neste trabalho.

O PP-g-MA é um compatibilizante de polipropileno enxertado com anidrido maleico, o que aumenta a adesão da carga na matriz, conforme observado na Figura 5, que apresenta micrografias de PP com fibras naturais sem compatibilizante (a) e com compatibilizante (b). Observa-se a falta de adesão entre as fibras e a matriz no compósito não compatibilizado, pela presença de vãos. No compósito compatibilizado esses vãos não são observados.

Figura 5 - Micrografias da superfície fraturada em ensaio de tração de compósitos de PP reforçado com fibra natural: (a) sem e (b) com agente compatibilizante.

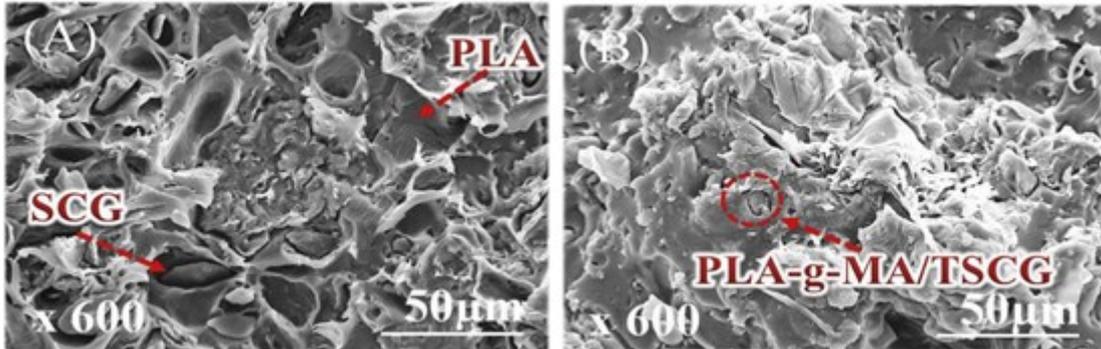


Fonte: Autor “adaptado de” Bettini *et al.*, 2010, Bonse *et al.*, 2010

Outros estudos, de blendas de PET/PP realizados no Departamento de Tecnologia de Polímeros da Faculdade de Engenharia Química da UNICAMP, mostraram que o uso do polipropileno enxertado com anidrido maleico (PP-g-MA) como compatibilizante permite reduzir significativamente os tamanhos dos domínios da fase dispersa, influenciando diretamente na tensão interfacial dos componentes (dos Santos, 1998).

Um estudo de Wu (2015) mostrou que borra de café tratada (TSCG) e o uso de compatibilizante (PLA graftizado com anidrido maleico, PLA-g-MA) melhoraram a adesão entre a borra de café (SCG) e a matriz PLA, conforme observado nas micrografias de microscopia eletrônica de varredura (MEV) na Figura 6.

Figura 6 - Micrografias de MEV mostrando a distribuição e adesão de SCG ou TSCG em compósitos (a) PLA/SCG (20% em massa) e (b) PLA-g-MA/TSCG (20% em massa).



Fonte: Wu, 2015

### 2.6.2 Outros tratamentos superficiais das cargas naturais

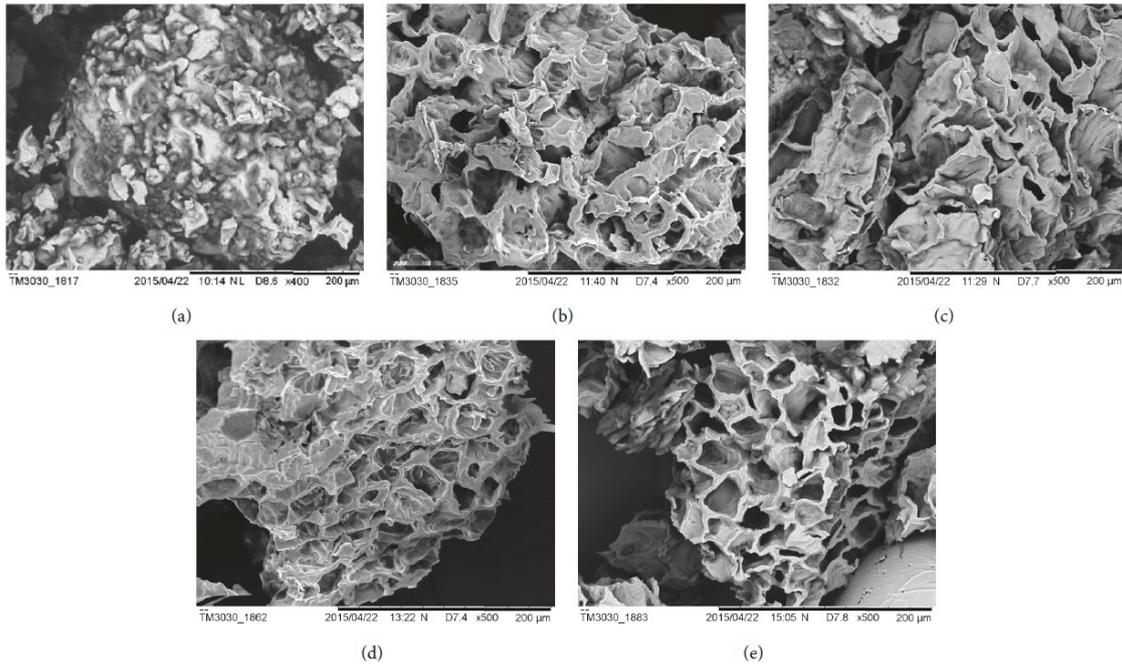
Outros tratamentos como alongamento das fibras, envelhecimento, tratamentos térmicos, impregnação das fibras, etc. são utilizados para promover a melhor interação entre cargas naturais e matrizes.

Além dos tratamentos usando agente compatibilizante ou agente de acoplagem, os tratamentos químicos podem ocorrer por uso de substâncias alcalinas e a acetilação (FARUK *et al.*, 2012; MOHANTY, 2005).

As micrografias na Figura 7 mostram como um tratamento alcalina a diferentes tempos muda a superfície da borra de café, tornando a mais porosa e mais rugosa, promovendo um aumento na interação interfacial entre as partículas de BC e a matriz (TAN *et al.*, 2017).

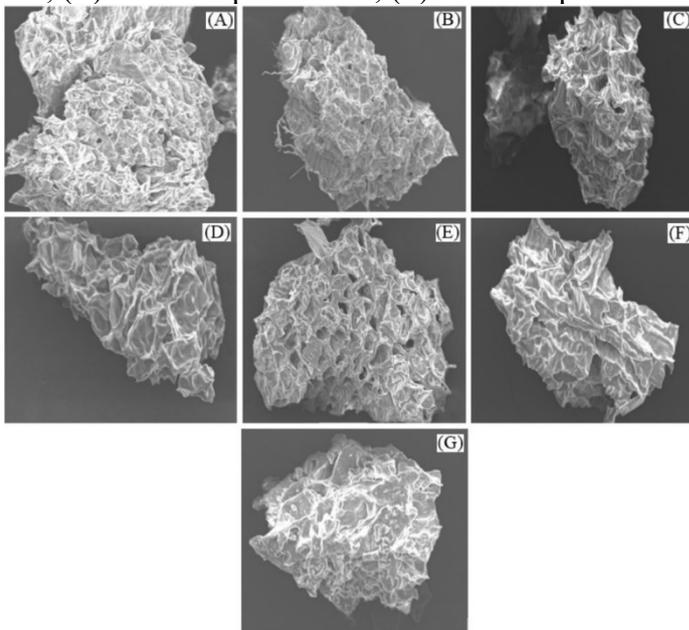
Embora Wu (2015), e vários outros autores, incluindo Tan *et al.* (2017) e Wongsiridetchai *et al.* (2018), considerem a borra de café como uma fibra natural, pelas micrografias na Figura 7 observa-se o aspecto da borra similar ao de fibras naturais, porém, pela razão de aspecto, o termo correto para a borra de café seria partícula fibrosa. O aspecto de partícula pode ser observado mais claramente nas micrografias da Figura 8.

Figura 7 - Micrografias de MEV de BC tratada com NaOH 1% por: (a) 0 h, (b) 1 h, (c) 6 h, (d) 12 h, (e) 24 h.



Fonte: Tan *et al.*, 2017

Figura 8 - Micrografias de MEV mostrando a aparência da superfície de borra de café tratada com NaOH 0,5 N: (A) a 50 °C por 6 h; (B) a 60 °C por 6 h; (C) a 70 °C por 6 h; (D) 80 °C por 6 h; (E) a 110 °C por 15 min; (F) a 121 °C por 30 min; (G) não tratado.



Fonte: Wongsiridetchai, 2018

### 3 MATERIAIS E METODOLOGIA

Nessa seção são apresentados os materiais, equipamentos, procedimentos de obtenção das amostras e sua caracterização.

#### 3.1 MATERIAIS

O polipropileno homopolímero utilizado foi fornecido pela Braskem na forma de grânulos (ou pellets), com o código PP homo H103, com índice de fluidez de 40 g/10min (230°C e 2,16 kg).

O agente compatibilizante utilizado para processamento do máster de PP com borra de café é o polipropileno graftizado com anidrido maleico (PP-g-MA), sob o código Polybond 3200 (IF = 110 g/10min a 190°C e 2,16 kg), com densidade de 0,92 g/cm<sup>3</sup>, adquirida da Crompton-Uniroyal Chemichal (São Paulo, Brasil).

A borra de café (BC) utilizada foi recolhida por doação da copa de uma instituição de curso superior.

#### 3.2 PROCESSAMENTO DA MISTURA E ENSAIOS

Neste tópico, apresenta-se o processamento (e suas condições) e os ensaios realizados nas amostras.

##### 3.2.1 Extrusão

A extrusão é um processo de processamento de materiais de forma contínua. Os produtos obtidos com este processo são baseados em perfis contínuos, como tubos, placas e filmes.

Para a produção do *masterbatch*, a borra de café foi seca a 105°C por 12 horas em estufa com recirculação de ar. A borra foi, então, misturada com a matriz e compatibilizante por tamboreamento manual, produzindo um *masterbatch* com 40% BC e 10% em massa de compatibilizante, sendo o restante de matriz polimérica.

O *masterbatch* de PP-BC foi extrudado em uma extrusora de rosca dupla com diâmetro de 16 mm e uma razão de L/D de 25 da marca Thermo Scientific HAAKE PolyLab OS RheoDrive, modelo PTW 16 (Figura 9). O extrudado do monofilamento foi resfriado em uma calha com água e granulada utilizando granulador SAGEC modelo SG-35.

Figura 9 - Extrusora Thermo Scientific com calha de água e granulador.



Fonte: Autor

As condições de processamento do *masterbatch* PP-BC estão apresentadas na Tabela 3.

Tabela 3 - Condições de extrusão do *masterbatch* PP-BC.

<b>Condição</b>	<b>PP-BC</b>
<b>Rotação (rpm)</b>	300
<b>Perfil de temperaturas (°C)</b>	
<b>Zona 1</b>	170
<b>Zona 2</b>	185
<b>Zona 3</b>	190
<b>Zona 4</b>	190
<b>Zona 5</b>	190
<b>Zona 6</b>	190

Fonte: Autor

### 3.2.2 Injeção

A injeção é um processo de produção cíclica de polímeros. Em um paralelo com metais, a injeção é similar ao processo de fundição, na qual o material é levado ao estado líquido e, por fim, inserido em um molde de maior temperatura de fusão para que este adquira sua forma final ou próxima da final.

O *masterbatch* produzido por extrusão passou por uma nova secagem a 80°C por 12 horas antes da injeção. A injeção foi realizada na injetora Battenfeld mostrada na figura a seguir:

Figura 10 - Injetora Battenfeld utilizada para obtenção dos corpos de prova.



Fonte: Autor

Na Tabela 4 estão apresentadas as condições de processamento de injeção.

Tabela 4 - Condições de injeção dos corpos de prova.

<b>Condição</b>	<b>PP-BC</b>
<b>Pressão na rosca (bar)</b>	600
<b>Pressão de recalque (bar)</b>	480
<b>Tempo de molde (s)</b>	15
<b>Temperatura do molde (°C)</b>	50
<b>Velocidade de dosagem (mm/s)</b>	200
<b>Volume de dosagem (cm<sup>3</sup>)</b>	37
<b>Temperatura Zona 1 (°C)</b>	200
<b>Temperatura Zona 2 (°C)</b>	190
<b>Temperatura Zona 3 (°C)</b>	185
<b>Temperatura do Bico (°C)</b>	200

Fonte: Autor

Primeiro, a composição de PP puro foi processada, descartando os primeiros 10 corpos de prova. As composições com 40% BC foram processadas antes das demais, pois em seguida, o *masterbatch* restante foi diluído com o polímero matriz puro para a formulação das composições de 10%, 20% e 30% BC. Uma nova composição com 20% BC e 20% de compatibilizante (em peso de BC) também foi processada para análise da influência do compatibilizante, sendo que esta composição foi processada diretamente, sem a produção de *masterbatch*. Todos os corpos de prova foram numerados conforme a ordem de injeção. Por motivo de facilitação, as composições foram nomeadas a partir do seu teor de BC (x%BC), exceto a composição de 20%BC e 20% de compatibilizante, sendo nomeada de 20%BC/2.

Os corpos de prova para impacto Charpy, eram iguais aos corpos de prova do ensaio de flexão, porém entalhados com um entalhe de 2 mm.

### 3.2.3 Ensaio de tração

O ensaio de tração é definido, segundo a norma ASTM D638 de 2014, como um teste de determinação de propriedades de polímeros reforçados e não reforçados, aplicando-se um esforço trativo em um corpo de prova de geometria padronizada até que este seja rompido.

Quando um esforço uniaxial é aplicado em uma secção transversal, resulta-se em uma tensão ( $\sigma$ ), segundo a equação a seguir:

$$\sigma = \frac{F}{A_0} \quad (1)$$

Onde:

$\sigma$ : Tensão de tração [MPa];

F: Força aplicada [N];

$A_0$ : Área transversal inicial [mm<sup>2</sup>].

A aplicação da tensão resulta na deformação ( $\varepsilon$ ) do material, neste caso, do corpo de prova. A deformação resulta em um aumento de comprimento ( $\Delta L$ ), medido por extensômetros presos ao polímero; os extensômetros são inicialmente separados por 50 mm. A equação a seguir mostra o cálculo da deformação:

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0} \quad (2)$$

Onde:

$\varepsilon$ : deformação em mm/mm;

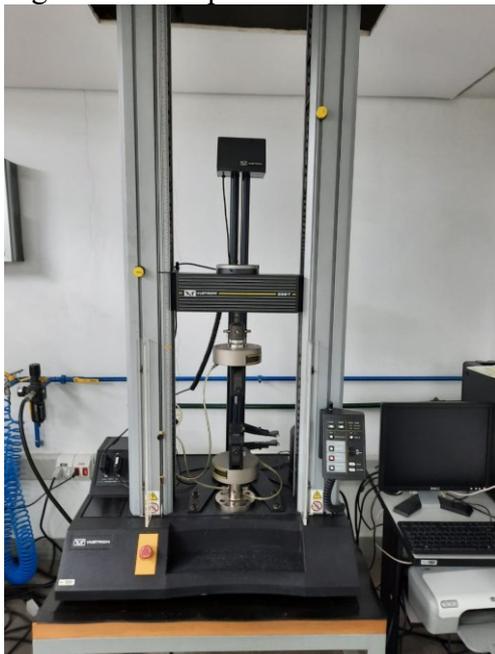
$\Delta L$ : Variação do comprimento em mm;

$L_0$ : Comprimento inicial do corpo de prova.

Antes do ensaio, as dimensões da secção transversal dos corpos de provas foram medidas com um paquímetro digital de 0,01mm de precisão e inseridas no Software do equipamento.

O ensaio foi realizado utilizando uma Máquina Universal de Ensaios Instron, com acessório de ensaio de tração e célula de carga de 5kN. Segundo a norma ASTM D638, foram ensaiados 5 corpos de prova de cada composição, com uma velocidade de ensaio de 50 mm/min. Para os corpos de prova que excediam um alongamento de 500%, o ensaio foi paralisado com 500% de deformação.

Figura 11 - Máquina Universal de Ensaios Instron com acessórios para ensaio de tração.



Fonte: Autor

Pelos resultados obtidos no ensaio, determinou-se o módulo elástico de tração, tensão de tração e deformação na ruptura de cada material. O módulo elástico de tração foi obtido pelo coeficiente angular do trecho elástico da curva tensão-deformação do ensaio, enquanto a tensão de tração é a maior tensão suportada pelo polímero.

### 3.2.4 Ensaio de flexão em três pontos

O ensaio de flexão consiste em aplicar uma força em um corpo de prova bi-apoiado, sendo este espaçamento entre os apoios definido como 50 mm. Mede-se, portanto, a força aplicada no material e flecha de deformação no material (CALLISTER, 2000).

O ensaio de flexão pode ser realizado em três ou quatro pontos. A grande alteração destas duas variantes está nas forças aplicadas: em três pontos, a força é aplicada no meio entre os dois apoios; em quatro pontos, são duas forças, aplicadas cada uma em metade da distância entre metade da amostra e o apoio.

O ensaio de flexão em três pontos permite uma análise melhor de propriedades de um material frágil, pois há regiões de compressão e tração, obtendo resultados mais precisos sobre a resistência à flexão. Realizado na Máquina Universal de Ensaio Instron com acessório de ensaio de flexão em 3 pontos (Figura 12). O ensaio de flexão foi realizado segundo a norma ASTM D790, com espaçamento entre os apoios de 50 mm. Foram ensaiados 5 corpos de prova para cada composição, com término do ensaio em 5% de deformação e velocidade de 2,5 mm/min.

Figura 12 - Acessório para flexão em 3 pontos.



Fonte: INSTRON

### 3.2.5 Ensaio de Impacto Charpy

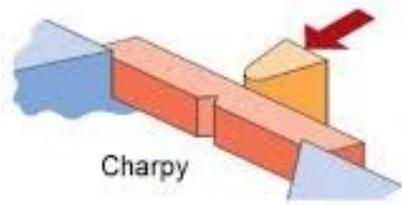
O ensaio de impacto Charpy permite a quantificação da energia absorvida na ruptura ao impacto. O impacto ocorre ao se erguer um pêndulo (chamado de martelo) de dimensões conhecidas. O pêndulo possui uma energia potencial gravitacional e, quando há o choque com o corpo de prova, a energia absorvida é medida pela altura final do martelo.

O corpo de prova consiste em um corpo de prova de forma de paralelepípedo, similar

ao de ensaio de flexão, porém com um entalhe de 2 mm, com enfoque em criar um concentrador de tensão para que a fratura ocorra naquela região.

O equipamento apresenta o valor de energia absorvida no impacto, na qual é para a dimensão conhecida do corpo de prova. Essa dimensão é utilizada para o cálculo da energia por área, sendo medida em  $[kJ/m^2]$ .

Figura 13 - Esquema de impacto em um corpo de prova de ensaio Charpy.



Fonte: Autor “adaptado de” AfinkoPolímeros, 2019

O ensaio foi realizado seguindo a norma ASTM D6110, utilizando o pêndulo de 1 J. Foram ensaiados 10 corpos de prova de cada composição, descartando aqueles que apresentaram valores distantes daqueles que estão sendo medidos. O equipamento utilizado está apresentado na figura a seguir:

Figura 14 - Pêndulo para ensaio de impacto Charpy.



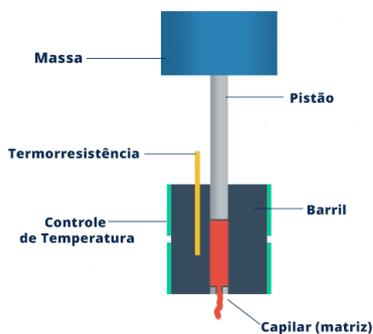
Fonte: Autor

### 3.2.6 Ensaio de índice de fluidez (IF)

O ensaio de índice de fluidez é utilizado para a determinação da vazão de extrusão de um polímero fundido através de um capilar de dimensões conhecidas. As condições desta extrusão, como temperatura e pressão, são conhecidas e pré-determinadas. A pressão é determinada por meio de uma massa conhecida, como por exemplo 2,16 kg.

O equipamento utilizado neste ensaio é o plastômetro de extrusão, sendo constituído de um capilar de dimensões conhecidas, um pistão, aquecimento por resistência e pela câmara de fundição.

Figura 15 - Esquema de um plastômetro de extrusão.



Fonte: AfinkoPolímeros, 2019

A norma utilizada no ensaio é a D1238, sendo a temperatura de ensaio para 230°C, com 2,16 kg de massa. O equipamento utilizado é o Plastômetro de extrusão CEAST-Italy.

Figura 16 - Equipamento para ensaio de índice de fluidez CEAST-Italy.



Fonte: Autor

### 3.2.7 Temperatura de deflexão térmica (HDT)

O ensaio de HDT consiste na determinação da temperatura na qual ocorre uma queda abrupta nas propriedades do polímero. Essa determinação ocorre no aquecimento de um corpo de prova (taxa de aquecimento de  $2^{\circ}\text{C}/\text{min}$ ) submetido a uma tensão de flexão de 0,455 MPa ou 1,82 MPa. Segundo a norma ASTM D 648 a temperatura de HDT é determinada quando a deflexão do polímero é de 0,25 mm.

O corpo de prova utilizado neste é similar ao utilizado no ensaio de flexão. Suas dimensões são medidas para que se adicione uma carga para que a tensão de flexão seja aquela determinada para o ensaio.

O uso de cargas de reforço, como fibras ou partículas podem aumentar a temperatura de deflexão térmica, pois estas dificultam a mobilidade das cadeias (JAFELICE, 2013).

O equipamento utilizado é o HDT-VICAT da CEASt-Italy (Figura 17), sendo uma tensão de flexão de 1,82MPa e uma taxa de aquecimento de  $2^{\circ}\text{C}/\text{min}$ . A carga adicionada para atingir a tensão determinada foi calculada e adicionada ao suporte do ensaio.

Figura 17 - Equipamento HDT-VICAT da CEASt-Italy utilizado no ensaio HDT.



Fonte: Autor

### 3.2.8 Simulação em Granta EduPack

O EduPack é um software administrado pela CES-Ansys o qual permite a comparação e seleção de materiais com base nas propriedades mecânicas, físicas, químicas, térmicas, reológicas e propriedades de processamento. Além das propriedades do material, pode-se comparar custo de produção, pegada de carbono em produção e aplicação, custo entre outros dados socio-econômicos.

O software trabalha em uma biblioteca (*database*) para gerar uma lista de materiais para uma série de restrições e critérios para os materiais conforme solicitado pelo usuário. Para o

material escolhido, é possível escolher o processo apropriado por meio de fatores como custo, complexidade, *design*, impacto ambiental ou quantidade produzida.

A função *Synthesizer* do EduPack permite sintetizar compostos e compósitos com base nas matrizes e cargas disponíveis e utilizá-los para comparações pelas propriedades efetivas destes materiais. Os materiais criados nesta função podem ser comparados com os materiais disponíveis na biblioteca comum do software (ASHBY *et al.*, 2012).

Neste trabalho, o material de comparação foi o PP-10%BC usando suas propriedades máximas e mínimas determinadas em cada ensaio. A ferramenta de *Synthesizer* foi utilizada para produzir compósitos com cargas particuladas naturais fornecidas pelo software em uma matriz de PP homopolímero de alto IF, similar ao utilizado nas amostras ensaiadas. As comparações foram baseadas na semelhança entre os materiais, comparando inicialmente com os materiais sintetizados e, em uma segunda comparação, com polímeros termoplásticos. Para uma comparação mais exata, a função *Find Similar* também foi utilizada para encontrar materiais similares para a comparação.

## 4 RESULTADOS E ANÁLISE

Nesta seção, os resultados e suas análises estão apresentados. Para avaliar se as variações observadas nos resultados, conforme o teor de borra de café aumenta, eram significativas, foi aplicada a análise de variância estatística ANOVA, que é um teste usado para comparar a média aritmética de grupos populacionais, por meio da análise de variâncias amostrais. No teste ANOVA, assumem-se duas hipóteses:  $H_0$ : as médias são iguais e  $H_1$ : as médias são diferentes, e o *valor-p*, representa a probabilidade de a hipótese nula ser verdadeira ou não. Se o *valor-p* for inferior a 0,05, rejeitamos  $H_0$ , ou seja, as médias não são iguais. Os valores de ANOVA estão apresentados no apêndice deste trabalho.

Os resultados de ensaios mecânicos, reológicos e térmicos são apresentados em forma de tabela, com os valores médios e em gráfico para um melhor comparativo visual. Vale ressaltar que para facilitar a explicação e escrita, a composição com 20%BC e 4%PP-g-MA será chamada de 20%BC/2 nas imagens.

Os corpos de prova apresentaram aparência de madeira escura, conforme a imagem a seguir:

Figura 18 - Corpos de prova de PP-BC.



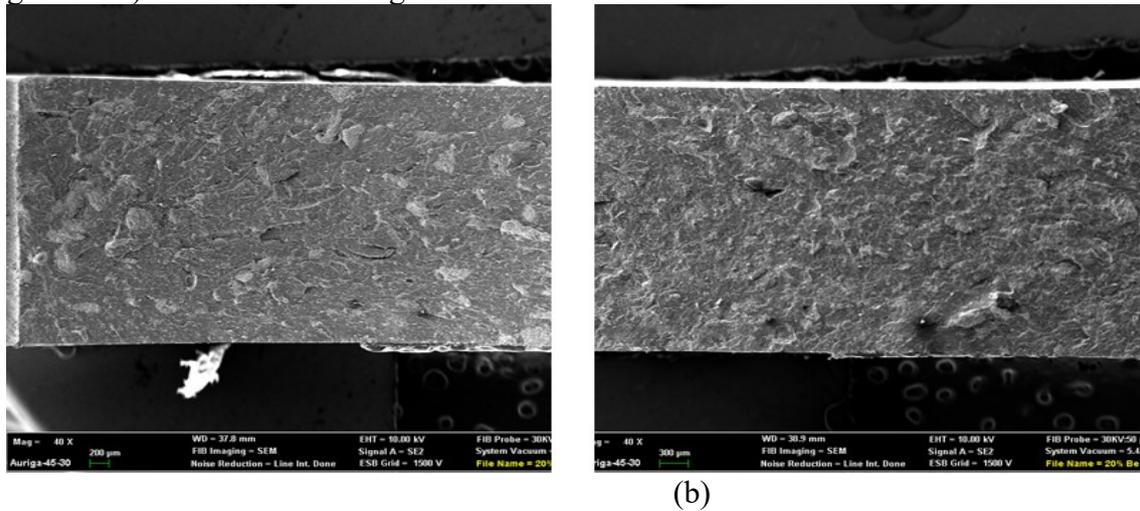
Fonte: Autor

### 4.1 ANÁLISE DE MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA

Ressalta-se que por motivos orçamentários foram feitas análises por MEV apenas de das composições contendo 20% BC com, respectivamente, 2% e 4% de PP-g-MA.

As micrografias da análise morfológica da superfície fraturada no impacto dos corpos de prova encontram-se a seguir, Figura 19 e Figura 20.

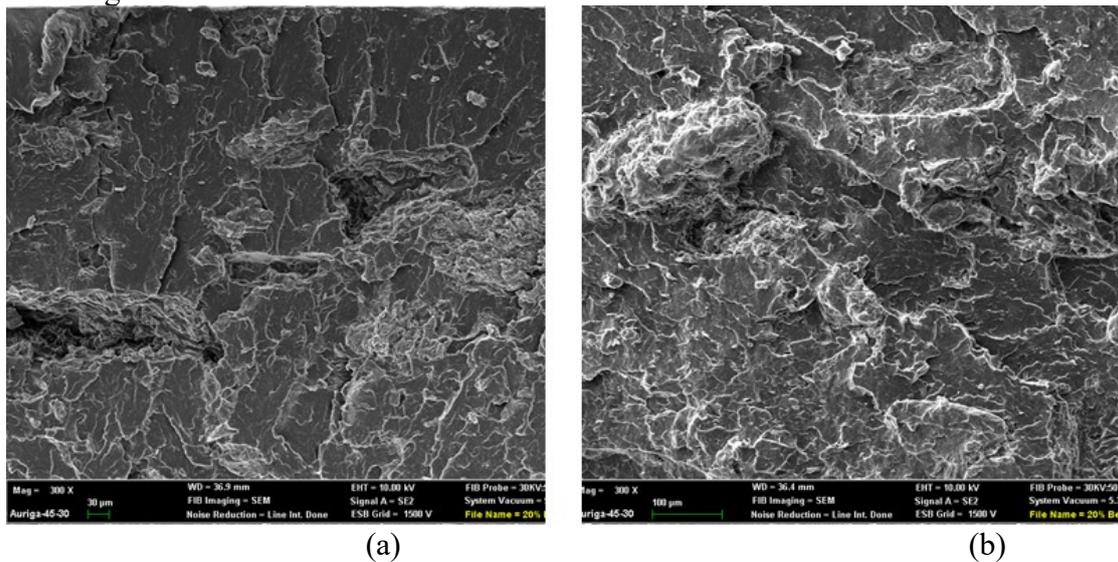
Figura 19 - Micrografias com aumento de 40x referentes à composição: a) 20% BC e 2% PP-g-MA e b) 20% BC e 4% PP-g-MA.



Fonte: Autor

A comparação das micrografias das composições 20% BC contendo 2 e 4% PP-g-MA, na Figura 19, mostra que com maior concentração da agente compatibilizante as partículas da BC se tornem visualmente menos destacadas nas micrografias, justificado pelo aumento do molhamento pela matriz. Porém, o aumento do teor de agente compatibilizante não fez muita diferença na adesão das partículas com a matriz, notado pela pouca diferença no molhamento comparando as duas micrografias.

Figura 20 - Micrografias referentes à composição: a) 20% BC e 2% PP-g-MA e b) 20% BC e 4% PP-g-MA.



Fonte: Autor

Observa-se na Figura 20 que tanto na composição com 2% de PP-g-MA (a) como com 4% de PP-g-MA, há uma boa adesão entre a matriz de PP e as partículas de BC, pois na falta de adesão observam-se vãos entre as partículas da carga e a matriz. No caso da BC não foram observados vãos na interface (BETTINI *et al.*, 2010 e BONSE *et al.*, 2010).

#### 4.2 ENSAIO DE TRAÇÃO

Os resultados de ensaio de tração estão disponibilizados a seguir. Inicia-se a discussão pelo módulo de tração:

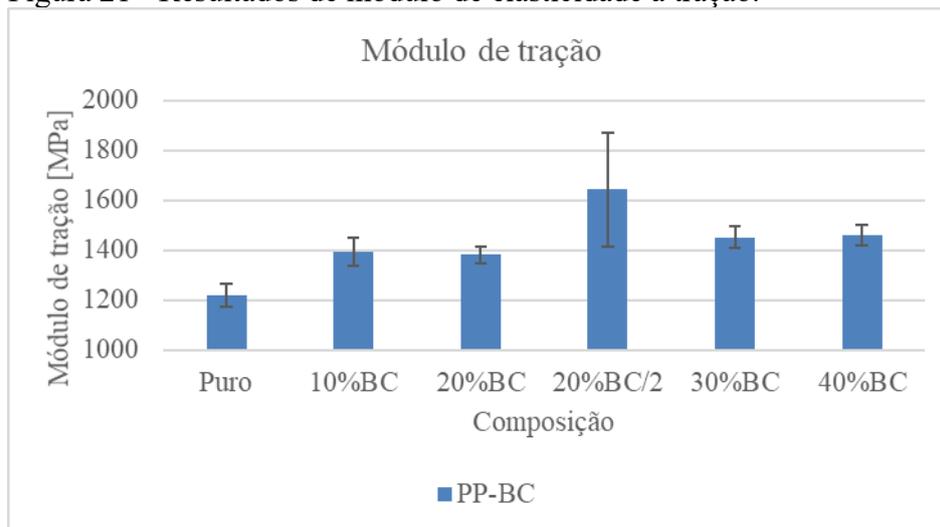
Tabela 5 - Resultados de módulo de elasticidade à tração.

#### Módulo de elasticidade à tração [MPa]

	PP-BC	Desvio Padrão
Puro	1220	50
10%BC	1390	50
20%BC	1380	30
20%BC/2	1640	230
30%BC	1450	40
40%BC	1460	40

Fonte: Autor

Figura 21 - Resultados de módulo de elasticidade à tração.



Fonte: Autor

Quanto ao módulo de elasticidade a 0,3%, Figura 21, houve um aumento da rigidez com o aumento da porcentagem de BC, sendo o aumento de 20% em relação ao PP puro da

composição com 40% de BC. O aumento no teor de compatibilizante (de 2% para 4%) na composição 6 trouxe um maior aumento no módulo de tração, enquanto a diferença do módulo de tração entre as composições com 20% BC e diferentes teores de compatibilizante foi de 20%.

De acordo com Rabelo (2000), em geral o uso de cargas de enchimento rígidos resulta em maior rigidez e menor resistência à tração, enquanto uma carga de reforço rígida, além da rigidez, melhora a resistência à tração. Este trabalho ainda ressalta que em geral a presença de cargas rígidas em matrizes dúcteis reduz a tenacidade do material, enquanto essas cargas em matrizes frágeis podem resultar em resistência ao impacto superior.

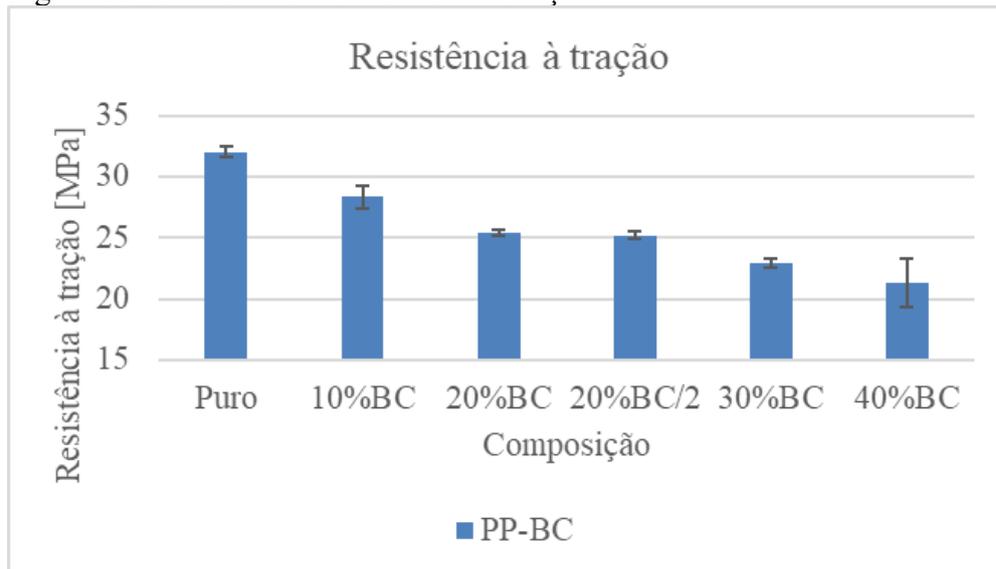
Apresenta-se os dados e a discussão sobre resistência à tração:

Tabela 6 - Resultados de resistência à tração.

Resistência à tração [MPa]		
	PP-BC	Desvio Padrão
Puro	32,1	0,5
10%BC	28,4	0,9
20%BC	25,4	0,3
20%BC/2	25,2	0,3
30%BC	22,9	0,4
40%BC	21,3	2,0

Fonte: Autor

Figura 22 - Resultados de resistência à tração.



Fonte: Autor

Observa-se que a resistência à tração foi reduzindo para composições com maior teor de BC. Suspeitava-se que isso tivesse ocorrido pela falta de compatibilização adequada,

aumentando assim as falhas na interface, fragilizando o material de forma a diminuir a deformação na ruptura e a tensão que é aplicada quando a ruptura acontece. Porém, conforme observado pela análise de MEV, não havia indícios de falta de adesão. Assim, uma hipótese levantada é que a BC tenha uma resistência menor que a matriz de PP, resultando assim numa queda da resistência do composto à medida que aumenta a concentração de BC.

A maior queda na resistência à tração ocorreu na composição de 40%, com redução de 36% em relação ao PP puro. Os resultados da ANOVA mostraram que a composição PP-20%BC/2 possui resistência à tração semelhante à composição PP-20%BC, ou seja, o teor de compatibilizante não influenciou a resistência à tração. Conforme observado nos resultados da análise por MEV, havia indícios de maior molhamento pelo agente compatibilizante, porém não de diferença na adesão.

Apresenta-se os dados e a discussão sobre deformação na ruptura:

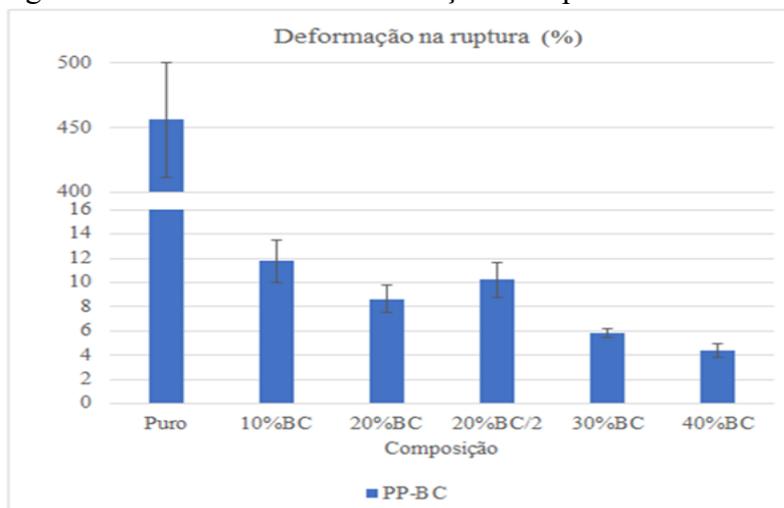
Tabela 7 - Resultados de deformação na ruptura.

#### Resistência à flexão [MPa]

	PP-BC	Desvio Padrão
Puro	456	45
10%BC	11,7	1,8
20%BC	8,62	1,12
20%BC/2	10,2	1,5
30%BC	5,81	0,38
40%BC	4,39	0,60

Fonte: Autor

Figura 23 - Resultados de deformação na ruptura.



Fonte: Autor

Quanto a alongamento na ruptura, este sofreu uma queda abrupta, de 456% no PP puro para menos de 15% em todas as outras composições. Isso era esperado, pois cargas rígidas em matrizes dúcteis reduzem bastante a deformação na ruptura, por restringirem a movimentação das cadeias polimérica. Quando se compara as composições com 20% e diferentes teores de compatibilizante, o aumento no teor de compatibilizante não influenciou a deformação na ruptura, pois o valor  $p$  da análise por ANOVA foi 0,0868, ou seja, maior que 0,05 (RABELO 2000; BETTINI *et al.*, 2010; BONSE *et al.*, 2010).

### 4.3 ENSAIO DE FLEXÃO

Os resultados de ensaio de flexão estão disponibilizados a seguir. Inicia-se a discussão pelo módulo de flexão:

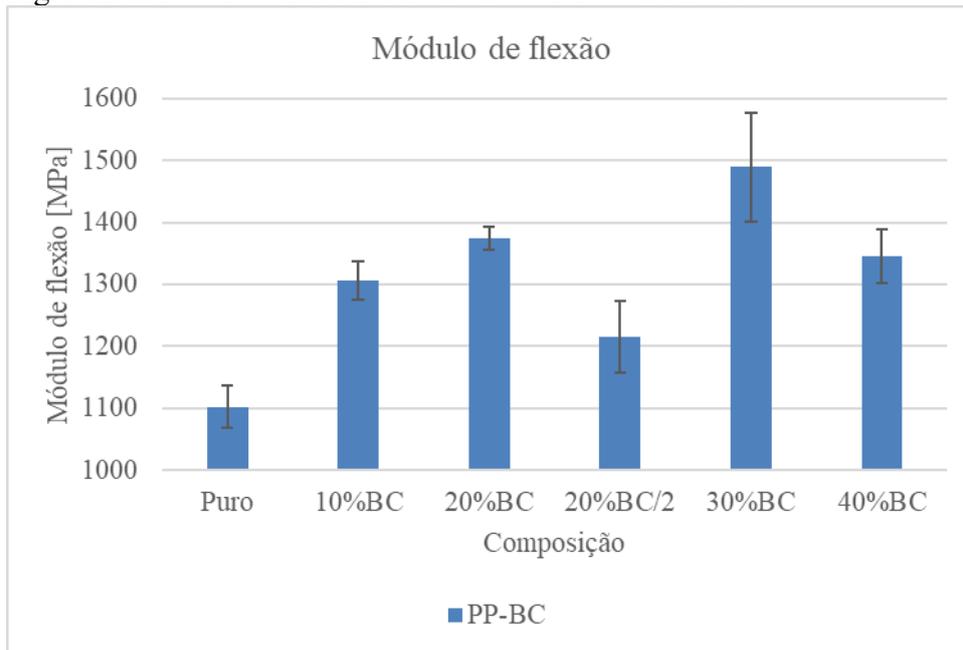
Tabela 8 - Resultados de módulo de elasticidade à flexão.

#### **Módulo de elasticidade à flexão [MPa]**

	PP-BC	Desvio Padrão
Puro	1100	30
10%BC	1310	30
20%BC	1370	20
20%BC/2	1220	60
30%BC	1490	90
40%BC	1350	40

Fonte: Autor

Figura 24 - Resultados do módulo de elasticidade à flexão.



Fonte: Autor

Quanto ao módulo de flexão à deformação de 0,3%, observa-se que todas as composições, resultaram em módulo maior do que a do PP puro. Esperava-se um aumento sempre contínuo, pois quanto mais carga rígida maior seria o módulo. O maior aumento do módulo em relação ao PP puro foi de 35% para a composição com 30% BC. O módulo diminuiu em 12% quando se compara as duas composições com 20%BC.

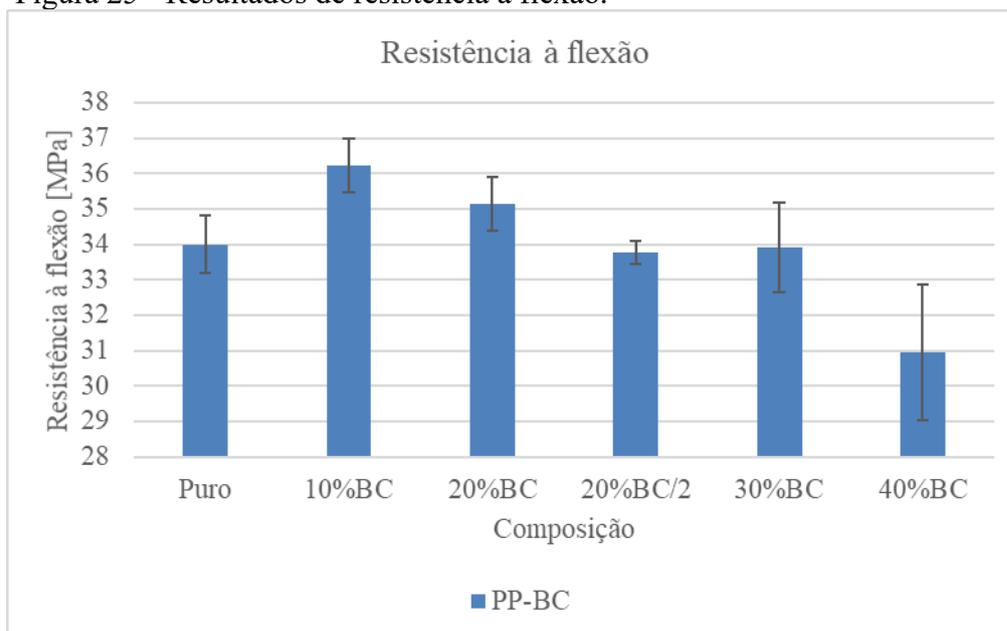
Apresenta-se os dados e a discussão sobre resistência à flexão:

Tabela 9 - Resultados de resistência à flexão.

Resistência à flexão [MPa]		
	PP-BC	Desvio Padrão
Puro	34,0	0,8
10%BC	36,2	0,8
20%BC	35,2	0,8
20%BC/2	33,8	0,3
30%BC	33,9	1,3
40%BC	31,0	1,9

Fonte: Autor

Figura 25 - Resultados de resistência à flexão.



Fonte: Autor

Quanto à resistência à flexão, os compósitos com 10% e 20% BC possuem resistência ligeiramente maior que o PP puro, porém para 40% BC, essa resistência reduziu. Esse comportamento é diferente daquele da resistência à tração que mostrou uma redução constante com o aumento do teor de BC. Comportamento semelhante para fibras de PET não compatibilizadas em matriz de PP foi observado por Nonato e Bonse (2016). Observaram uma redução na resistência à tração, porém um ligeiro aumento na resistência à flexão. Explicaram que durante os ensaios de flexão, as amostras são submetidas a esforços de tração e de compressão. Os esforços de compressão podem reduzir o tamanho de defeitos gerados pela carga o que pode explicar por que a resistência à flexão aumenta mesmo com uma quantidade maior de cargas não compatíveis. Vale ressaltar que a composição de 10% BC obteve uma resistência 7% maior em relação ao PP puro, enquanto a composição com 40% BC apresentou uma redução em 9%.

Quando há a comparação entre as duas composições com 20% BC, na qual varia o teor de PP-g-MA, houve uma leve redução na resistência à flexão, de aproximadamente 4% entre estas.

#### 4.4 ENSAIO DE IMPACTO CHARPY

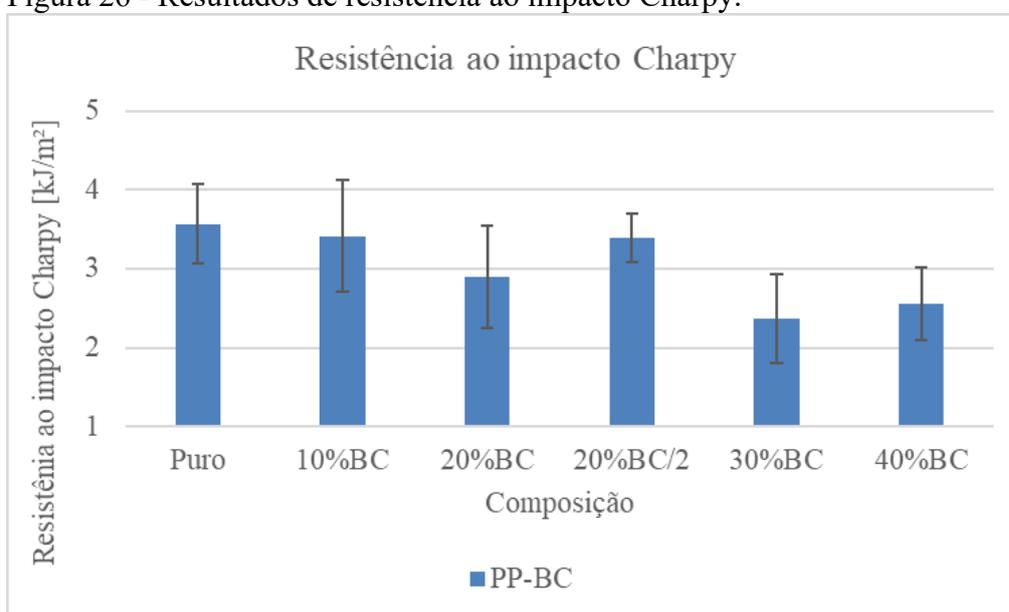
Os resultados de ensaio de impacto Charpy:

Tabela 10 - Resultados de resistência ao impacto Charpy.

Resistência ao impacto Charpy [kJ/m <sup>2</sup> ]		
	PP-BC	Desvio Padrão
Puro	3,57	0,50
10%BC	3,42	0,71
20%BC	2,90	0,64
20%BC/2	3,40	0,31
30%BC	2,37	0,56
40%BC	2,55	0,46

Fonte: Autor

Figura 26 - Resultados de resistência ao impacto Charpy.



Fonte: Autor

Assim, os resultados mostram que para valores relativamente baixos de BC (10% e 20%) a incorporação não altera muito a resistência ao impacto. Somente para teores mais elevados de 30% e 40% observam-se uma queda expressiva. Isto pode ser devido a uma restrição na mobilidade das cadeias poliméricas causada pela carga de borra mais rígida. Como mostrado nos ensaios de flexão e tração, a BC resultou em uma maior rigidez quando comparado ao PP puro, o que indica que as cadeias poliméricas do material se tornaram menos móveis por causa das partículas de BC presente entre elas. Com redução da mobilidade das cadeias, diminui a energia absorvida no impacto. Além disso, possíveis falhas na interface funcionam como concentradores de tensão, reduzindo também a energia absorvida para a ruptura.

A maior queda na resistência ao impacto em relação ao PP foi de quase 40%, observada na composição contendo 30% BC.

Para todos os ensaios, as propriedades da BC na matriz agiram de forma semelhante, fazendo com que a rigidez fosse aumentada, porém a resistência diminuiu. Houve flutuação de dados relativamente alta.

#### 4.5 ENSAIO DE ÍNDICE DE FLUIDEZ

Os resultados do ensaio de índice de fluidez estão apresentados a seguir:

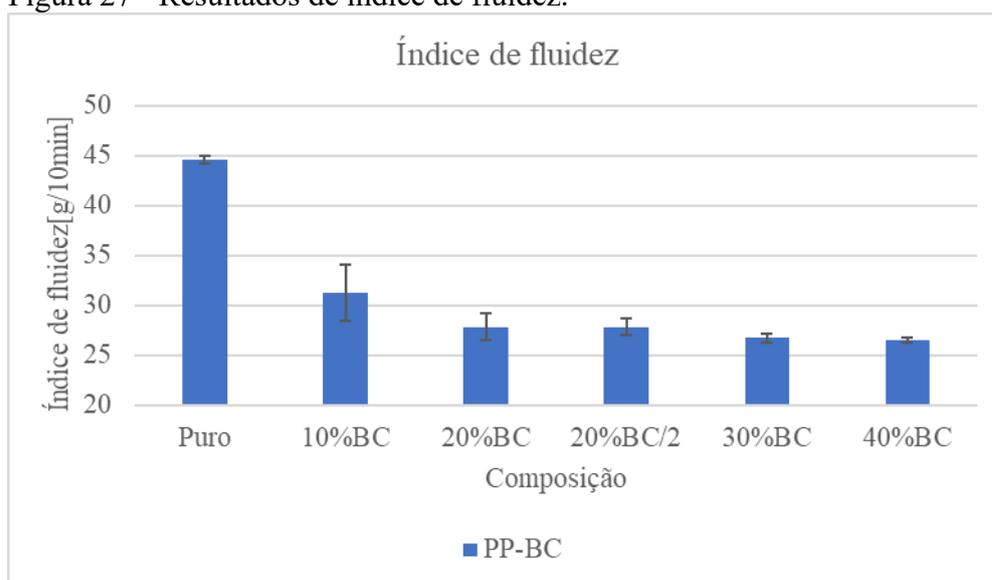
Tabela 11 - Resultados de índice de fluidez.

#### Índice de fluidez [g/10min]

	PP-BC	Desvio Padrão
Puro	44,6	0,4
10%BC	31,2	2,8
20%BC	27,9	1,3
20%BC/2	27,9	0,8
30%BC	26,8	0,5
40%BC	26,5	0,2

Fonte: Autor

Figura 27 - Resultados de índice de fluidez.



Fonte: Autor

Observa-se que o valor encontrado para o PP puro é similar ao valor fornecido pelo fabricante de 40 g/10 min a 2,16 kg e 230°C. Ressalta-se que embora as composições utilizadas

no trabalho não tenham sido processadas a 230°C, a norma pede para que o índice de fluidez de PP seja realizado a carga de 2,16 kg e temperatura de 230°C. Além do mais, a intenção é verificar como a incorporação da carga e do agente compatibilizante afetam a fluidez do PP.

Nota-se que houve uma diminuição abrupta na fluidez do material com a adição de BC, sendo a maior redução para a composição com 40% BC, a qual reduziu em aproximadamente 38%. A composição PP-20%BC/2 segundo a análise ANOVA, resultou em um mesmo IF, ou seja, o aumento do teor de compatibilizante não trouxe mudança de resultados nesta propriedade comparado com a composição de PP-20%BC.

#### 4.6 ENSAIO DE HDT

Os resultados do ensaio de HDT (tensão de flexão de 1,82 MPa) estão apresentados a seguir:

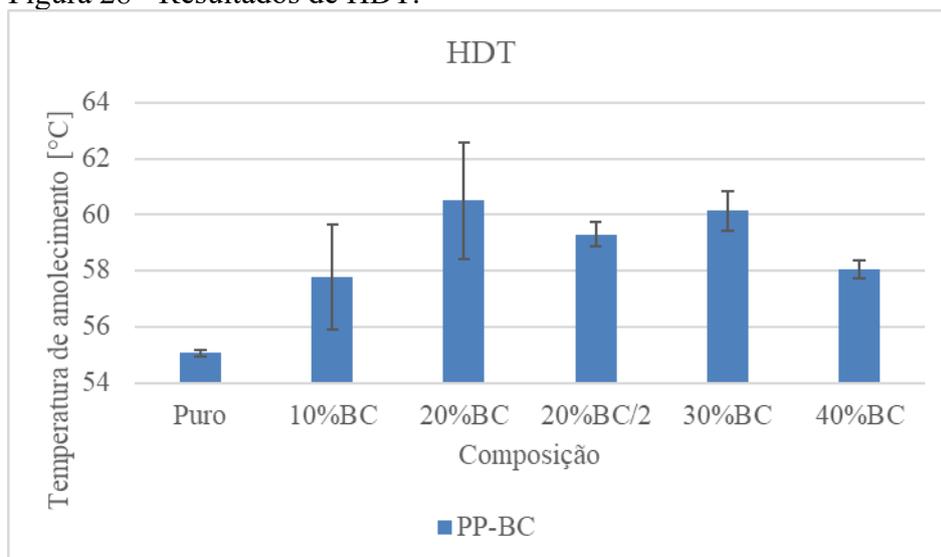
Tabela 12 - Resultados de HDT.

#### Temperatura de deflexão térmica [°C]

	PP-BC	Desvio Padrão
Puro	55,1	0,1
10%BC	57,8	1,9
20%BC	60,5	2,1
20%BC/2	59,3	0,4
30%BC	60,1	0,7
40%BC	58,0	0,3

Fonte: Autor

Figura 28 - Resultados de HDT.



Fonte: Autor

Assim como ocorreu no estudo feito por García-García (2015), a borra de café agiu como um estabilizador térmico à mistura, sendo que a temperatura de distorção no ensaio aumentou para todas as composições, sendo o principal aumento para a composição com 20% BC, sendo um aumento de cerca de 10% em comparação com o PP puro. Pelo valor  $p$  observado de 0,3831, o aumento no teor de compatibilizante de 2% para 4% para 20% BC não afetou HDT.

#### 4.7 SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL GRANTAEDUPACK

Com base nas propriedades obtidas nos ensaios, as composições foram comparadas para aquela que possui melhor combinação de propriedades. Concluiu-se que a composição de PP-10%BC foi aquela com maior otimização de propriedades. Apresenta-se as propriedades desta composição:

Tabela 13 - Propriedades do PP-10%BC para análise.

Propriedades PP-10%BC		
Propriedade	Mínimo	Máximo
Módulo de Tração [GPa]	1,36	1,47
Resistência à Tração [MPa]	27,2	29,8
Deformação na ruptura [%]	8,83	13,6
Módulo de Flexão [GPa]	1,29	1,36
Resistência à Flexão [MPa]	35,5	37,1
Resistência ao impacto Charpy [kJ/m <sup>2</sup> ]	1,96	4,70
Índice de Fluidez (g/10min)	29,3	33,2
Temperatura HDT [°C]	55,6	59,0
Densidade [g/cm <sup>3</sup> ]	0,817	0,998

Fonte: Autor

A densidade utilizada na Tabela 13 foi calculada por meio da Lei das Misturas, utilizando as seguintes densidades ( $\rho$ ):

- PP: 0,905 g/cm<sup>3</sup> (Firmino, 2011)
- PP-g-MA: 0,92 g/cm<sup>3</sup> (Fornecedor)
- BC: 0,93 g/cm<sup>3</sup> (Zhang, 2019)

Então, a densidade total de uma mistura pode ser definida pelo somatório do produto densidade de cada componente pelo seu teor, conforme a equação a seguir:

$$\rho = \sum x_i \rho_i \quad (3)$$

Calculando a densidade do composto PP-10%BC:

$$\rho_{BC} = x_{PP} * \rho_{PP} + x_{PP-g-MA} * \rho_{PP-g-MA} + x_{BC} * \rho_{BC} \quad (4a)$$

$$\rho_{BC} = 0,89 * 0,905 + 0,01 * 0,92 + 0,10 * 0,93 \quad (4b)$$

$$\rho_{BC} = 0,90765 \text{ g/cm}^3 \quad (4c)$$

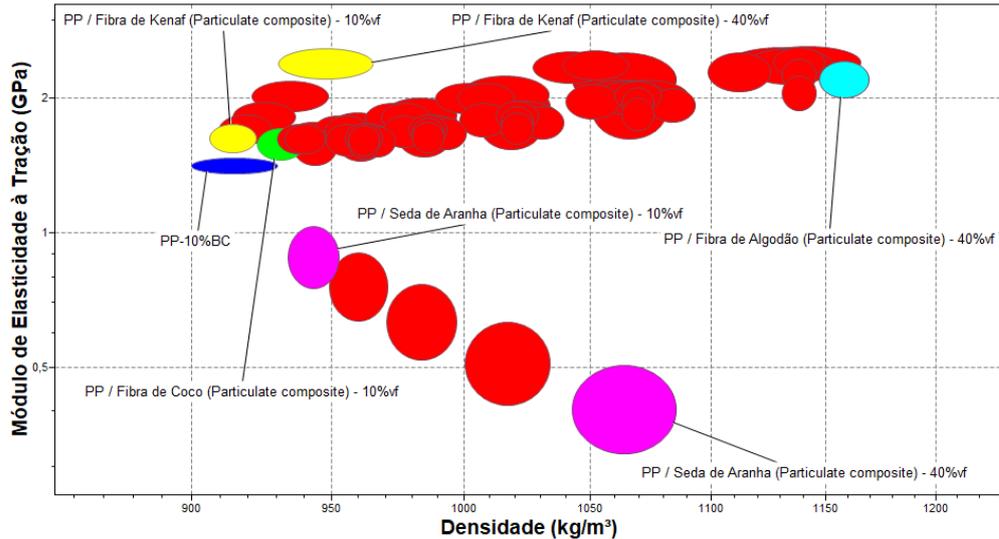
Para que se obtenha um intervalo para a análise computacional, utilizou-se uma variação de 10% para mais e para menos em relação ao cálculo da equação (4), logo os valores de máximo e mínimo utilizados foram apresentados na tabela.

Utilizando a função *synthesizer* do software Granta EduPack foram sintetizados compósitos naturais de matriz de PP com Alto IF (similar ao utilizado no compósito deste

trabalho). O software sintetiza os materiais por meio da fração volumétrica dos materiais. Como a densidade do PP, BC e do PP-g-MA são próximas, aproximou-se a fração mássica para fração volumétrica.

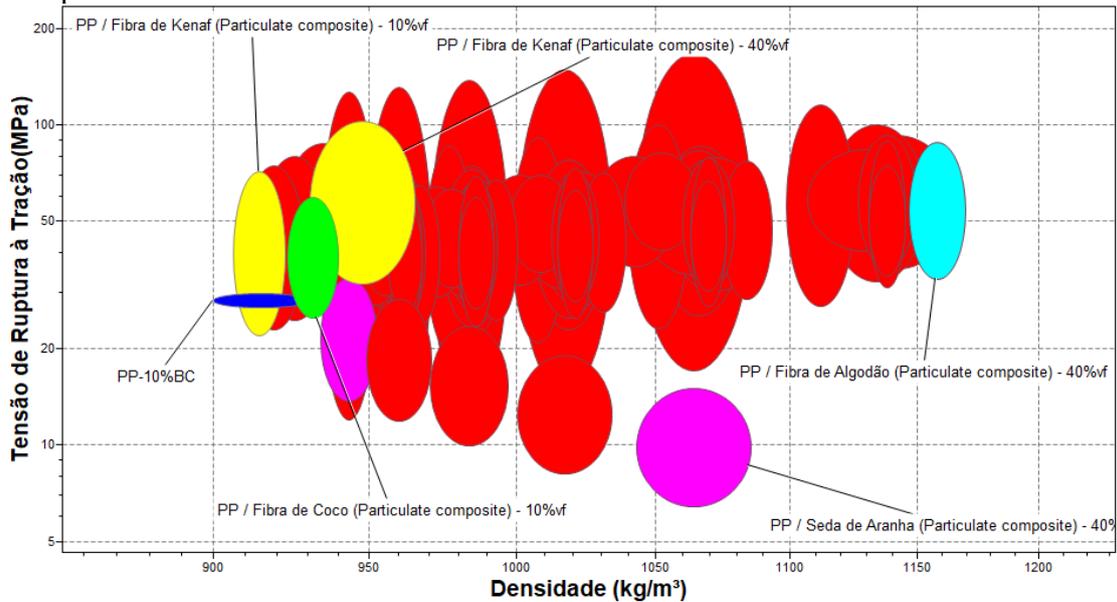
Apresenta-se os dados do comparativo entre PP-10%BC (em azul *royal*) e os compósitos naturais de matriz de PP disponíveis na base de dados do software:

Figura 29 - Comparativo do módulo de elasticidade à tração para compósitos naturais.



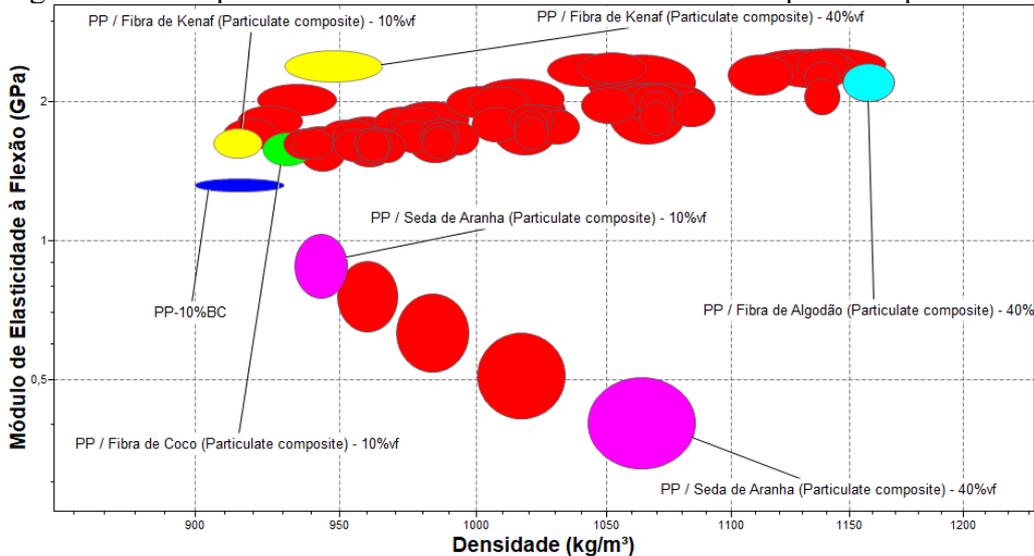
Fonte: EDUPACK, 2021

Figura 30 - Comparativo do Tensão de Ruptura à Tração (ou Resistência à tração) para compósitos naturais.



Fonte: EDUPACK, 2021

Figura 31 - Comparativo do módulo de elasticidade à flexão para compósitos naturais.



Fonte: EDUPACK, 2021

Com base nos gráficos de propriedades, os compósitos que mais se assemelham com o PP-10%BC foram o PP-10%v Fibra de coco (PP-Fibra de coco em verde) e PP-10%v Fibra de kenaf (PP-Fibra de kenaf em amarelo). Vale ressaltar que o PP-40%v Fibra de kenaf é o compósito mais rígido. Outros compósitos de propriedades notáveis incluem PP-40%v Fibra de algodão por ser o compósito com maior densidade, além de consideráveis propriedades mecânicas. Em contrapartida, os compósitos de PP com seda de aranha são aqueles com menores propriedades.

A fibra kenaf pode ser incorporada ao poliéster e ao polietileno. Como aplicação, a fibra de kenaf pode ser utilizada como carga em material polimérico para a produção de painéis integrados utilizados em isolamento acústico e térmico, sendo que a sua condutividade térmica é similar ao de outros produtos para tal uso com outras fibras naturais. (ARDENTE *et al.*, 2008; CORREIA, 2011; LIPS, 2007).

A fibra de coco é utilizada para produção de materiais de enchimento, como estofamento em colchões, bancos e almofadas, embalagens biodegradáveis, carga de enchimento em concreto não-estrutural. As aplicações citadas são fruto das propriedades da fibra de coco: baixa densidade, elevadas propriedades mecânicas específicas e baixo consumo de energia e custo de produção. Outra possibilidade é a produção de compósitos de fibra de coco e material celulósico em cobertura de construções. (CASTILHOS, 2012).

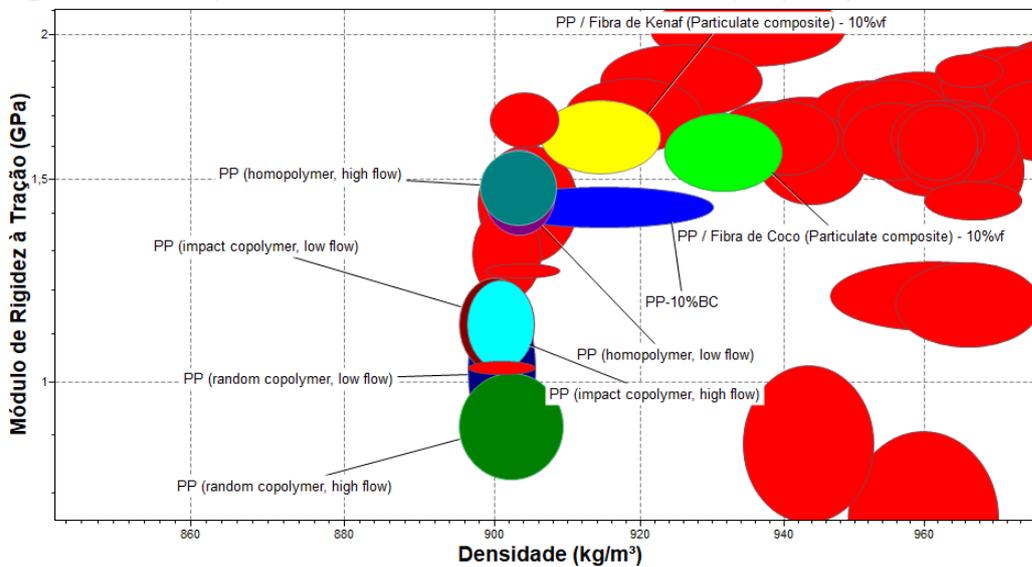
A borra de café tem sido utilizada, junto ao polietileno de baixa densidade e a areia verde, para a produção de tijolos naturais. Os tijolos naturais de borra de café possuem baixa densidade, isolamento térmico e isolamento acústico e estes são produzidos por prensagem, na

qual não necessita de queima como ocorre com os tijolos de cerâmica tradicionais, sendo vantajosos do ponto de vista ecológico-econômico (FARIA *et al.*, 2014).

O PCS da borra de café, com 17% de umidade encontrada por Caldeira (2016) é de 19,9 MJ/kg, o que demonstra ser um material com muita energia na queima, sendo um problema para a utilização do PP-BC em painéis de isolamento térmico, pois pode ocorrer a combustão deste painel, além da própria liberação de energia térmica pela reação. Porém, com o comparativo, os compósitos de PP-BC poderiam ser utilizados para a produção de painéis de isolamento térmicos de baixas temperaturas e isolamento acústico, produção de cimentos estruturais e tijolos. Uma vantagem para a substituição da fibra de Kenaf e da fibra de coco pela borra de café está na disponibilidade da borra principalmente no Brasil, onde o café é consumido em grandes escalas e de forma não-centralizada, o que resulta em borra de café distribuída pelo país inteiro de fácil acesso.

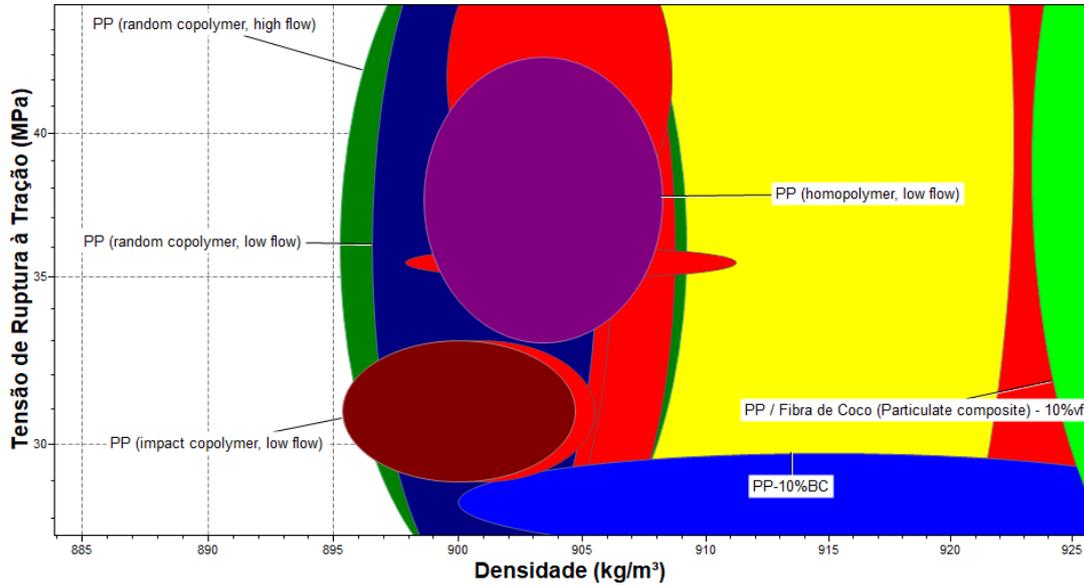
Apresenta-se os dados do comparativo entre PP-10%BC (em azul *royal*) e polímeros termoplásticos disponíveis na base de dados do software:

Figura 32 - Comparativo do módulo de elasticidade à tração para polímeros termoplásticos.



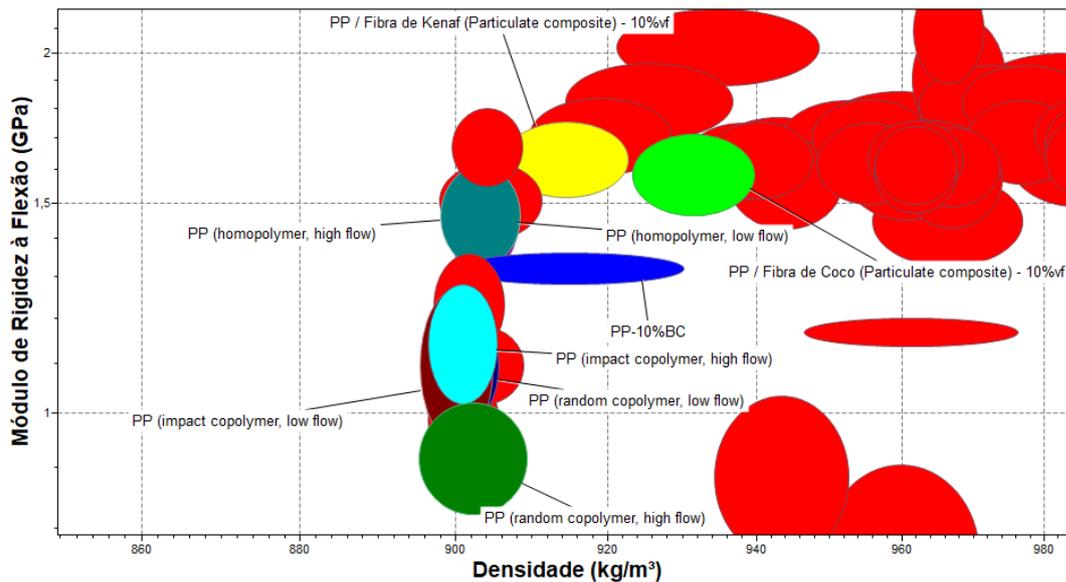
Fonte: EDUPACK, 2021

Figura 33 - Comparativo do Tensão de Ruptura à Tração (ou Resistência à tração) para termoplásticos.



Fonte: EDUPACK, 2021

Figura 34 - Comparativo do módulo de elasticidade à flexão para termoplásticos.



Fonte: EDUPACK, 2021

Dentre os dados apresentados, manteve-se os dois compósitos naturais para comparação. Os materiais mais próximos encontrados comparando as propriedades mecânicas de tração e flexão, o PP copolímero randômico e o PP homopolímero (alto e baixo IF) são os polímeros que mais se assemelham ao composto de PP-10%BC. Os copolímeros aleatórios de alto e baixo IF, além do copolímero aleatório de alta resistência ao impacto, também de alto e baixo IF, se assemelham ao PP-10%BC.

O PP pode ser utilizado em mesas e cadeiras (exemplo: Figura 35). Estes materiais são produzidos normalmente de copolímero de PP aleatório para que sejam mais resistentes ao

impacto. Pelas propriedades necessárias para a produção destas cadeiras, o uso de PP-10%BC pode ser aplicado, porém a resistência ao impacto deste material seja baixa em comparação ao PP Copolímero aleatório de alto IF (entre 5,39 e 10,2 kJ/m<sup>2</sup>), sendo resolvido por um aumento nas dimensões das regiões mais frágeis, como os pés da cadeira. Outra solução é a adição de modificadores de impacto ao compósito, promovendo uma melhoria na tenacidade do compósito.

Figura 35 - Kit de mesa e cadeira de plástico.



Fonte: Catálogo Somel

O maior problema para o uso do PP-10%BC nas mesas cadeiras e a resistência está no odor de café que o material possui. A aplicação em cafeterias pode ser uma opção considerável, pois a aparência amadeirada e odor característico de café seria aceitável, além da resistência mecânica necessária.

Como a borra de café age como carga de enchimento, utiliza-se uma quantidade menor de PP na produção do compósito, podendo gerar redução no custo final do produto. Segundo o fornecedor, o custo do PP homopolímero de alto IF, similar ao utilizado como matriz neste trabalho, é de R\$ 17,40 (29/05/2021).

Ao analisar uma produção de uma tonelada métrica, o custo de uma peça com a matriz pura (100%PP) seria de R\$ 17400,00. Em uma produção de mesma massa com 10%BC e 90%PP, o custo da borra de café pode ser considerado próximo de zero, logo o preço da mesma

peça sairia entre R\$ 15600,00, custo 10% menor. Considerando o processamento, a injeção ainda seria necessária, podendo realizar a mistura dos materiais neste equipamento, então pode-se considerar o mesmo custo para ambos materiais, resultando numa economia significativa para processamentos elevados.

Pela função *find similar* do *software*, além dos materiais já considerados anteriormente, o PP com 10% carbonato de cálcio ( $\text{CaCO}_3$ ) obteve compatibilidade de 97% com o PP-10%BC. O carbonato de cálcio é a carga mais utilizada em materiais poliméricos, com cerca de 70% de todas as cargas utilizadas (LEBLANC, 2010; MOLINA, 2015).

O carbonato de cálcio é um material de baixo custo, usado para pigmentação branca e melhoria nas propriedades mecânicas dos polímeros, além de controlar a expansão térmica do polímero. O baixo custo da carga, aliado à baixa densidade do compósito e às propriedades mecânicas fazem com que este material seja competitivo com alguns metais como na produção de placas para a indústria automobilística (LUZ; LINS, 2008; MARINUCCI, 2011).

O carbonato de cálcio é comercializado em duas formas: a forma natural, onde não há um controle tão rígido na geometria e tamanho de partículas e a forma precipitada, com maior controle. Esta segunda forma, com grãos ultrafinos ( $<1,5 \mu\text{m}$ ), resulta em um compósito com propriedades mecânicas otimizadas em relação à forma natural (LUZ; LINS, 2008).

Segundo Luz e Lins (2008), o compósito de PP com carbonato de cálcio é muito utilizado para a produção de fraldas, filmes, móveis, materiais de construção civil e mecânica, sacolas de lixo, tubos, baldes, embalagens, papéis e garrafas sintéticas. A comparar com o PP-10%BC, alguns usos podem ser semelhantes, como a produção de móveis, materiais de construção não estrutural dentro do ramo automobilístico (painéis, mostradores, itens de acabamento), lixos e outros tipos de acessórios.

A utilização do PP-10%BC em embalagens de alimentos e garrafas sintéticas pode ser uma realidade, mas há a necessidade de um estudo mais aprofundado quanto ao material ser inerte fisicamente, sem resultar em desprendimento de matéria no líquido contido na garrafa, por exemplo.

Quanto ao custo, segundo a plataforma Kunal Calcium, o custo do carbonato de cálcio natural de uso industrial é de R\$ 8000,00 por tonelada métrica. O custo total do PP com 10% de carbonato de cálcio estaria em torno de R\$ 16460,00. Comparando com o custo do PP-10%BC (R\$ 15600,00), o material deste trabalho poderia substituir o carbonato de cálcio em muitas aplicações, reduzindo o custo, a densidade e reaproveitando a borra de café.

## 5 CONCLUSÕES

Borra de café a 40% em massa contendo 10% de agente compatibilizante em relação à borra, foi incorporado com êxito em polipropileno usando uma extrusora de dupla rosca corrotante. Desta composição foram injetados corpos de prova contendo 10%, 20%, 30% e 40% de borra. A borra de café se comportou como uma carga de enchimento, e não como reforço, evidenciado pela redução da resistência à tração com a sua incorporação. Algumas propriedades foram otimizadas, enquanto outras foram reduzidas.

Como esperado, a carga aumentou a rigidez do PP, sendo que a energia absorvida no ensaio de impacto caiu em torno de 30% para a amostra com 30% BC. Quando submetido ao ensaio de flexão, a resistência à flexão aumentou em torno de 7% para a composição com 10% de carga, enquanto houve uma queda de 9% para a composição de 40% BC. No ensaio de tração, houve uma redução na resistência à tração, na qual a maior variação foi de 36% para a composição de 40% BC. Conforme o aumento da carga, a rigidez do material aumentou, alcançando 20% a mais para a composição de 40% BC.

A fluidez do material com BC, quando o comparado ao PP puro, caiu em cerca de 38%, mas o aumento no teor de borra não trouxe alteração no resultado dessa propriedade.

O aumento do teor de compatibilizante para 20% em massa de BC para a composição PP-20%BC resultou em uma melhoria pouca expressiva de algumas propriedades mecânicas, como módulo à tração, deformação na ruptura, além de um leve aumento na temperatura de degradação do material. Outras propriedades, como resistência à flexão e índice de fluidez, não foram afetadas. A resistência à flexão e o módulo de flexão tiveram queda com o aumento de compatibilizante. De forma geral, o aumento no teor de compatibilizante não trouxe aumento significativo, apesar de indícios de um melhor molhamento da carga pela matriz, conforme análise de MEV.

Pela aparência de madeira escura das peças finais, como forma de aproveitamento a borra de café pode ser adicionada a matrizes termoplásticas *commodities*, virgens ou reciclados, para objetos decorativos não-estruturais.

A simulação constatou que o composto de PP-10%BC se assemelhou com outros compósitos naturais de matriz de PP com 10%v de cargas de fibra de coco e fibra de kenaf. Dentre os materiais termoplásticos disponíveis, a semelhança se deu com o PP homopolímero e copolímero.

A partir da comparação dos materiais, concluiu-se que a composto apresentado neste trabalho pode ter aplicação em materiais de uso comercial, obtendo-se uma redução de custo

do material além do reaproveitamento da borra e café em escala de aproveitamento não-artesanal.

## REFERÊNCIAS

- AFINKOPOLÍMEROS. **IMPACTO IZOD OU CHARPY?** Disponível em: <https://afinkopolimeros.com.br/impacto-izod-ou-charpy-ja-ouviu-falar>. Acesso em 19 out. 2020.
- AFINKOPOLÍMEROS. **ENSAIO DE ÍNDICE DE FLUIDEZ.** Disponível em: <https://afinkopolimeros.com.br/tudo-sobre-o-indice-de-fluidez-if-ou-mfi>. Acesso em 19 out. 2020.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D1238 – 20. Standard Test Method for Melt Flow Rates of Thermoplastics by Extrusion Plastometer.** 2020. Disponível em: <http://www.astm.org/Standards/D1238>. Acesso em 19 out. 2020.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D6110 – 18. Standard test method for determining the Charpy impact resistance of notched specimens of plastics.** 2018. Disponível em: <http://www.astm.org/Standards/D6110>. Acesso em 19 out. 2020.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D638 – 14. Standard test method for tensile properties of plastics.** 2014. Disponível em: <http://www.astm.org/Standards/D638>. Acesso em 19 out. 2020.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D648 – 18. Standard test method for deflection temperature of plastics under flexural load in the edgewise position.** 2018. Disponível em: <http://www.astm.org/Standards/D648>. Acesso em 19 out. 2020.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D790 – 17. Standard test methods for flexural properties of unreinforced and reinforced plastics and electrical insulating materials.** 2017 Disponível em: <http://www.astm.org/Standards/D790>. Acesso em 19 out. 2020.
- Anuário ABIPLAST – Perfil 2019. Disponível em: <http://www.abiplast.org.br/publicacoes/perfil2019/>. Acesso em 14 abr. 2021.
- Ardente, F., Beccali, M., Cellura, M., Mistretta, M. 2008. **Building energy performance: A LCA case study of kenaf-fibres insulation board**, Energy and Buildings, 40, 1-10.
- ARULRAJAH A., MAGHOOLPILEHROOD F., DISFANI M. M., HORPIBULSUK, S. Spent coffee grounds as a non-structural embankment fill material: engineering and environmental considerations **Journal of Cleaner Production** 72, 181-186, 2014.
- ASHBY, Mike *et al.* **The CES EduPack Eco Audit Tool: a white paper.** Cambridge: Granta Teaching Resources, 2012. Disponível em: [https://proyectaryproducir.com.ar/public\\_html/Seminarios\\_Posgrado/Material\\_de\\_referencia/Ashby%20-%20ecoaudit.pdf](https://proyectaryproducir.com.ar/public_html/Seminarios_Posgrado/Material_de_referencia/Ashby%20-%20ecoaudit.pdf). Acesso em: 09 abr. 2021.

BAEK B.S., PARK J.W., LEE B.H. Development and application of green composites: using coffee ground and bamboo flour. **J. Polym. Environ**, 21, 702-709, 2013.

BALOW, M. J. **Global Trends for Polypropylene: handbook of polypropylene and polypropylene composites**, Lansing, Michigan: Marcel Dekker, Inc., cap 1, 2003.

BATALIOTTI, Murilo Dobri. **Avaliação da degradação do polipropileno sob múltiplas extrusões com e sem antioxidante**. 2016. 43 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia de Materiais, Departamento Acadêmico de Engenharia de Materiais, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Londrina, 2016.

BERNSTEIN, P. **5 roads to a circular economy – Part III: reusing waste**, 2016. Disponível em: <https://pre-sustainability.com/articles/5-roads-to-a-circular-economy-part-iii-reusing-waste>. Acesso em: 13 maio 2021.

BETTINI, S.H.P; BONSE, B.C.; MELO, E.A.; MUÑOZ, P. A. Effect of Sawdust Surface Treatment and Compatibilizer Addition on Mechanical Behavior, Morphology, and Moisture Uptake of Polypropylene/Sawdust Composites. **Polymer Engineering and Science**, v. 50, p. 978-985, 2010.

BONSE, B. C.; MAMEDE, M. C. S.; DA COSTA, R. A.; BETTINI S. H. P. Effect of Compatibilizer and Bamboo Fiber Content on the Mechanical Properties of PP-g-MA Compatibilized Polypropylene/Bamboo Fiber Composites. In: Proceedings of the Polymer Processing Society 26th Annual Meeting ~ PPS-26 ~ July 4-8, 2010 Banff (Canada).

BONSE, B. C.; CAPECCHI, G.; MARDEGAM, W. Y. Effect of Reprocessing on Properties of Sugarcane Bagasse Fiber Reinforced Polypropylene Composites. In: 28th International Conference of the Polymer Processing Society (PPS-28), 2012, Pattaya (Tailândia). Proceedings of PPS-28, 2012.

Braskem. Disponível em: <http://www.braskem.com.br/detalhe-noticia/Starbucks-Brasil-e-Braskem-lancam-iniciativa-inedita>. Acesso em: 21 out. 2020.

BRYMAN H. Disponível em: <https://dailycoffeenews.com/2015/08/21/seed-to-cup-to-grill-coffee-coals-turn-spent-grinds-into-bbq-fuel>. Acesso em: 21 out. 2020.

CALDEIRA, Diana Carminda Amorim. **Valorização da Borra de Café: otimização da produção de biodiesel por catálise enzimática**. 2015. 167 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Química, Departamento de Engenharia Química, Instituto Superior de Energia na Indústria Química, Porto, 2015.

CANAVARRO, Vasco José Guimarães. **Coffee powder reused as a composite material: a step in the right direction**. 2016. 134 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Produto e Design Industrial, Universidade de Porto, Porto, 2016.

CANEVAROLO Jr., S.V. **Ciência dos polímeros: um texto básico para tecnólogos e engenheiros** 2ª ed. São Paulo: Artliber Editora, 2006.

CASTILHOS, Lisiane Fernanda Fabro de. **Aproveitamento da fibra de coco**. Instituto de Tecnologia do Paraná. Curitiba: Serviço Brasileiro de Respostas Técnicas, 2011.

CERQUEIRA, E.F *et al.* Mechanical behaviour of polypropylene reinforced sugarcane bagasse fibers composites. **Procedia Engineering**, [S.L.], v. 10, p. 2046-2051, 2011. Elsevier BV. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.proeng.2011.04.339>. Acesso em 19 out. 2020.

Conexão Planeta. Disponível em: <http://conexaoplaneta.com.br/blog/marca-brasileira-transforma-borra-de-cafe-em-biojoias-e-objetos-de-decoracao>. Acesso em: 21 out. 2020.

Conselho Regional de Química; IV Região. Disponível em: <https://www.crq4.org.br/plasticos>. Acesso em 07 out. 2020.

CORREIA, Fúlvia Martins. **Balço Energético da Utilização de Kenaf na produção de energia e painéis isoladores, em Portugal**. 2011. 35 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Energia e Bioenergia, Departamento de Engenharia de Energia e Ambiente, Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, 2011.

ESSABIR, H. *et al.* Mechanical and thermal properties of bio-composites based on polypropylene reinforced with Nut-shells of Argan particles. **Materials & Design**, [S.L.], v. 49, n. 1, p. 442-448, ago. 2013. Elsevier BV. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.matdes.2013.01.025>. Acesso em 19 out. 2020.

FARIA, Ana Carolina Vasconcelos Miranda de *et al.* **ANÁLISE DE MISTURAS EFICIENTES PARA TIJOLOS DE SOLO-CIMENTO COM REAPROVEITAMENTO DE RESÍDUOS**. São Paulo: 14º Congresso de Iniciação Científica Conic/Semesp, 2014.

FERREIRA, Mariana Babilone de Souza. **Estudo da influência dos métodos de reticulação sobre as propriedades do polietileno**. 2017. 68 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia de Materiais, Rede Temática em Engenharia de Materiais, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2017.

FIRMINO, D. M. Estudo das propriedades mecânicas, reológicas e térmicas de nanocompósitos de HMSPP (polipropileno com alta resistência do fundido) com uma betonita brasileira. Instituto de Pesquisa Energética e Nucleares - IPEN. São Paulo, p. 119. 2011.

GARCÍA-GARCÍA D., CARBONELL A., SAMPER M., GARCÍA-SANOQUERA D., BALART R. Green composites based on polypropylene matrix and hydrophobized spend coffee ground (SCG) powder. **Compos. Part B**, 78, 256-265, 2015.

GREEN OPTIMISTIC. **Coffee Grounds Can be Used to Capture Carbon**. Disponível em: <https://www.greenoptimistic.com/coffee-grounds-carbon-capture/>. Acesso em: 05 maio 2021.

GUPTA, A. P. *et al.* Study of Flexural, Tensile, Impact properties and Morphology of Potato Starch/Polypropylene blends. **International Journal Of Advanced Research**, [S.I.], v. 2, n. 11, p. 599-604, 2014.

HOUSE, G. **HOUSE, M.D.** [S.I.]: Bad Hat Harry, 2004 - 2012.

INÁCIO, André Luis Natal. **Comportamento mecânico e térmico de compósitos de PP/EPDM/Talco reciclado contendo fibra de bambu**. 2014. 138 f. Dissertação (Mestrado) -

Curso de Engenharia de Materiais, Departamento de Engenharia Mecânica, Centro Universitário da FEI, São Bernardo do Campo, 2014

INSTRON. **THREE POINT BEND TEST FIXTURES**. Disponível em: <https://www.instron.us/en-us/products/testing-accessories/flexure-fixtures/three-point-bend-test-fixtures>. Acesso em: 20 maio 2021

JAFELICE, Domingos Antônio. **Caracterização de compósitos de polipropileno reciclado e fibra de coco**. 2013. 65 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia de Materiais, Universidade Presbiteriana Mackenzie, São Paulo, 2013.

KEMP K. C., BAEK S. B., LEE W-G, MEYYAPPAN M., KIM K. S. Activated carbon derived from waste coffee grounds for stable methane storage. **Nanotechnology**, Volume 26, Number 38, 2015.

KONDAMUDI, N., MOHAPATRA, S.K., MISRA, M. Spent coffee grounds as a versatile source of green energy. **J. Agric. Food Chem.** 56, 11757-11760, 2008.

LEBLANC, J. L. **Filled polymers: science and industrial applications**. 1. ed. New York: CRC, 2010.

LEIBEL, N. B.; BONSE, B. C. **Estudo da Utilização de Farelo de Trigo como Alternativa de Agente de Reforço em Termoplásticos**. In: 11º Congresso Brasileiro de Polímeros, 2011, Campos do Jordão.

LEITE, Victória Correia de Melo. **Efeito do tamanho de partícula de XLPE (polietileno reticulado) nas propriedades de PEAD (polietileno de alta densidade)**. 2017. 70 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia de Materiais, Departamento de Engenharia de Materiais, Centro Universitário da FEI, São Bernardo do Campo, 2017.

LIPS, S. **Final report of A & F, Biokenaf Project**, 52 p, 2007.

LUZ, A. B.; LINS, F. **Rochas e Minerais Industriais**. 1. ed. CETEM.2009.

MAIER, C., CALAFUT, T. **Polypropylene. The Definitive User's Guide and Databook**. Norwich NY: Plastics Design Library, 1998.

MANRICH, S.; **Processamento de Termoplásticos**, Editora ArtLiber, 2005.

MARINUCCI, G. **Materiais compósitos poliméricos: Fundamentos e tecnologia**, 1ed. São Paulo, Editora Artliber, 2011.

MICHAELI, W. **Training in Plastics Technology**. 2 ed. Munich: Hanser, 2000.

MOLINA, L. M.. **EFEITO DO TAMANHO DE PARTÍCULA DE CARBONATO DE CÁLCIO EM POLIAMIDA 6: processamento, propriedades mecânicas e térmicas**. 2015. 146 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Departamento de Engenharia Mecânica, Centro Universitário da Fei, São Bernardo do Campo, 2014.

MORANDI-GIANNETTI, A. A., PASQUOTO, C. G., SOMBA, T.M. *et al.* Polypropylene/chemically treated coir composites: optimizing coir delignification conditions using central composite design. **Cellulose**, 25, 1159-1170, 2018.

NASCIMENTO, U. A.; TIMÓTEO, G. A.; RABELLO, M. S. Efeito de plastificante à base de Poli-isobutenos nas propriedades físicas e mecânicas do Polipropileno. **Polímeros**, São Carlos, v. 23, p. 257 - 261, abril 2013.

NONATO, R. C; BONSE, B. C. A study of PP/PET composites: Factorial design, mechanical and thermal properties. **Polymer Testing** v. 56, p. 167-173, 2016.

RABELO, M. S. Aditivção de Polímeros. ed. 1. São Paulo: Artliber Editora Ltda, 2000. p. 179.

Revista ABIC. Disponível em: <https://www.abic.com.br/estatisticas/indicadores-da-industria/indicadores-da-industria-de-cafe-2020/>. Acesso em 01 jun. 2021.

Revista Globo rural. Disponível em: <https://revistagloborural.globo.com/Noticias/Agricultura/Cafe/noticia/2018/11/consumo-de-cafe-no-brasil-sobe-ate-35-em-2018.html>. Acesso em: 07 out. 2020.

Revista GreenMe. Disponível em: <https://www.greenme.com.br/usos-beneficios/3213-reutilize-borra-de-cafe-10-maneiras-diferentes>. Acesso em: 13 out. 2020.

ROCHA, R C. da. **Projeto de Moldes para fabricação de mancal de deslizamento por injeção de polímeros**. 2017. 59 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2017.

SANTOS, D. G. Efeito do uso de compatibilizante no processamento e produção de fios da blenda PET/PP. **Universidade de Campinas**, Campinas, fevereiro 1998.

SHIVNAND, H.K. *et al.* Evaluation of tensile and flexural properties of hemp and polypropylene based natural fiber composites. **2010 2nd International Conference On Chemical, Biological And Environmental Engineering**, [S.L.], v. 2, n. 1, p. 90-95, nov. 2010. IEEE. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/icbee.2010.5649456>. Acesso em 19 out. 2020.

SOARES, Emanuel Pereira. **DETERMINAÇÃO EXPERIMENTAL E SIMULAÇÃO DAS CURVAS DE DISTRIBUIÇÃO DE TEMPO DE RESIDÊNCIA NO PROCESSO DE EXTRUSÃO DE POLÍMEROS**. 2016. 164 f. Tese (Doutorado) - Curso de Ciência e Engenharia de Materiais, Centro de Ciências e Tecnologias, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2016.

SOMEL. Conjunto Gold. Disponível em: [https://sommel.com.br/wp-content/uploads/2020/10/Offwhite\\_Conjunto-Gold.png](https://sommel.com.br/wp-content/uploads/2020/10/Offwhite_Conjunto-Gold.png). Acesso em 07 out 2020.

TRIPATHI, D. **Practical Guide to Polypropylene**, Rapra Technology Limited – Shawbury, Shrewsbury, Shropshire, SY4 4NR, UK 2002.

UFSCAR, **Materiais Poliméricos: Ensaio de Flexão. Ensaio de Flexão**. Disponível em: <http://www.ccdm.ufscar.br/polimeros-ensaios-tecnicos/ensaios-mecanico/ensaio-de-flexao/>. Acesso em: 13 maio 2021.

WINANS., K; KENDALL, A.; DENG, H. The history and current applications of the circular economy concept. **Renew. Sustain. Energy Rev.**, vol. 68, no. October 2015, pp. 825–833, 2017.

WONGSIRIDETCHAI, C; CHIANGKHAM, W; KHLAIHIRAN, N; SAWANGWAN, T; WONGWATHANARAT, P; CHAROENRAT, T; CHANTORN, S. Alkaline pretreatment of spent coffee grounds for oligosaccharides production by mannanase from *Bacillus* sp. GA2(1). **Agriculture And Natural Resources**, [S.L.], v. 52, n. 3, p. 222-227, jun. 2018. Kasetsart University and Development Institute. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.anres.2018.09.012>.

WU C-S. Renewable resource-based green composites of surface-treated spent coffee grounds and polylactide: Characterization and biodegradability. **Polymer Degradation and Stability**, 121, 51-59, 2015. Acesso em 19 out. 2020.

ZAYDAR, U. Z. *et al* Preparation, structure, and properties of the coir fiber/polypropylene composites. **Journal of Composite Materials**, [S.L.], v. 48, n. 26, p. 3293-3301, 14 nov. 2013. SAGE Publications. DOI: <http://dx.doi.org/10.1177/0021998313508996>. Acesso em 19 out. 2020.

ZHANG, X.; Kwek, Li P.; Le, D. K.; TAN, Men S.; D., Hai M.. **Fabrication and Properties of Hybrid Coffee-Cellulose Aerogels from Spent Coffee Grounds**. *Polymers* 11, no. 12: 1942., 2019. DOI: <https://doi.org/10.3390/polym11121942>. Acesso em 31 mar. 2021.

### APÊNDICE A – Análise de ANOVA para os ensaios

Neste apêndice, apresenta-se as tabelas de dados ANOVA para os ensaios mecânicos realizados seguindo a ordem apresentada no tópico 4.

Para Ensaio de Tração:

Tabela 14 - Análise ANOVA para módulo de elasticidade à tração.

#### Análise ANOVA para Módulo de elasticidade à Tração

Composições Comparadas	Valor " <i>p</i> "
PP-10%BC	4,51E-02
PP-20%BC	
PP-20%BC	4,44E-02
PP-30%BC	
PP-30%BC	0,8947
PP-40%BC	
PP-20%BC	5,90E-04
PP-20%BC/2	

Fonte: Autor

Tabela 15 - Análise ANOVA para resistência à tração.

#### Análise ANOVA para Resistência à Tração

Composições Comparadas	Valor " <i>p</i> "
PP-10%BC	1,15E-04
PP-20%BC	
PP-20%BC	1,74E-06
PP-30%BC	
PP-30%BC	0,1098
PP-40%BC	
PP-20%BC	0,2713
PP-20%BC/2	

Fonte: Autor

Tabela 16 – Análise ANOVA para deformação na ruptura para ensaio de tração.

## Análise ANOVA para Deformação na Ruptura

Composições Comparadas	Valor "p"
PP-10%BC	1,07E-02
PP-20%BC	
PP-20%BC	7,17E-04
PP-30%BC	
PP-30%BC	2,14E-03
PP-40%BC	
PP-20%BC	8,68E-02
PP-20%BC/2	

Fonte: Autor

Para ensaio de flexão:

Tabela 17 - Análise ANOVA para módulo de elasticidade à flexão.

## Análise ANOVA para Módulo de elasticidade à Flexão

Composições Comparadas	Valor "p"
PP Puro	9,23E-06
PP-10%BC	
PP Puro	2,92E-07
PP-20%BC	
PP Puro	5,50E-03
PP-20%BC/2	
PP Puro	1,69E-05
PP-30%BC	
PP Puro	4,02E-05
PP-40%BC	
PP-20%BC	4,00E-04
PP-20%BC/2	

Fonte: Autor

Tabela 18 - Análise ANOVA para resistência à flexão.

## Análise ANOVA para Resistência à Flexão

Composições Comparadas	Valor "p"
PP Puro PP-10%BC	1,95E-03
PP Puro PP-20%BC	4,72E-02
PP Puro PP-20%BC/2	0,5732
PP Puro PP-30%BC	0,8885
PP Puro PP-40%BC	1,15E-02
PP-20%BC PP-20%BC/2	5,30E-02

Fonte: Autor

Para ensaio de impacto Charpy:

Tabela 19 - Análise ANOVA para resistência ao impacto Charpy.

Análise ANOVA para Resistência ao Impacto Charpy

Composições Comparadas	Valor "p"
PP Puro	0,5953
PP-10%BC	
PP Puro	1,90E-02
PP-20%BC	
PP Puro	0,3766
PP-20%BC/2	
PP Puro	8,58E-05
PP-30%BC	
PP Puro	1,80E-04
PP-40%BC	
PP-20%BC	4,09E-02
PP-20%BC/2	

Fonte: Autor

Para ensaio de índice de fluidez:

Tabela 20 - Análise ANOVA para índice de fluidez.

Análise ANOVA para Índice de Fluidez

Composições Comparadas	Valor "p"
PP-10%BC	0,2613
PP-20%BC	
PP-20%BC	0,3812
PP-30%BC	
PP-30%BC	0,5554
PP-40%BC	
PP-20%BC	0,1660
PP-20%BC/2	

Fonte: Autor

Para ensaio de HDT:

Tabela 21 - Análise ANOVA para ensaio de HDT.

Análise ANOVA para HDT

Composições Comparadas	Valor " <i>p</i> "
PP Puro	6,82E-02
PP-10%BC	
PP-10%BC	0,1666
PP-20%BC	
PP-20%BC	0,7872
PP-30%BC	
PP-30%BC	1,01E-02
PP-40%BC	
PP-20%BC	0,3831
PP-20%BC/2	

Fonte: Autor