

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO  
ESCOLA DE ENGENHARIA DE LORENA

RENAN AFONSO ROSSI NARDI

**Biocompósitos de celulose sob a ótica da economia circular**

LORENA - SP

2020

RENAN AFONSO ROSSI NARDI

**Biocompósitos de celulose sob a ótica da economia circular**

Trabalho de Conclusão de curso apresentado  
à Escola de Engenharia de Lorena da  
Universidade de São Paulo como um dos  
requisitos obrigatórios para a obtenção do  
título de Engenheiro Químico.

Orientadora: Profa. Dra. Talita Martins  
Lacerda

LORENA - SP

2020

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

Ficha catalográfica elaborada pelo Sistema Automatizado  
da Escola de Engenharia de Lorena,  
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

Nardi, Renan Afonso Rossi  
Biocompósitos de celulose sob a ótica da economia  
circular / Renan Afonso Rossi Nardi; orientadora  
Talita Martins Lacerda. - Lorena, 2020.  
42 p.

Monografia apresentada como requisito parcial  
para a conclusão de Graduação do Curso de Engenharia  
Química - Escola de Engenharia de Lorena da  
Universidade de São Paulo. 2020

1. Economia-circular. 2. Biocompósitos de  
celulose. 3. Sustentabilidade. 4. Materiais  
poliméricos. I. Título. II. Lacerda, Talita Martins ,  
orient.

## RESUMO

NARDI, R. A. R. **Biocompósitos de celulose sob a ótica da economia circular.** 2020. 42p. Trabalho de Conclusão de Curso – Escola de Engenharia de Lorena, Universidade de São Paulo, Lorena, 2020.

A crescente preocupação com a sustentabilidade vem impulsionando diversos setores a repensarem seus processos e produtos. O conceito de sustentabilidade é um importante pilar que sustenta uma nova forma de pensar as relações de consumo e descarte: o modelo da economia circular. Diversos segmentos da sociedade vêm contribuindo para otimizar a vida útil dos recursos, redefinindo o que é entendido hoje como resíduo. Entretanto, essa transição deverá acontecer de maneira particular para cada elo que compõe a sociedade, levando em conta as mudanças que serão necessárias para a adaptação de pessoas, produtos e processos. O mercado de polímeros foi um dos pioneiros dessa discussão, e agora faz-se necessário estendê-la para um dos seus importantes derivados: os compósitos de origem renovável (ou biocompósitos). Neste trabalho, aspectos referentes à economia circular de biocompósitos baseados em diferentes matrizes poliméricas e reforçados com fibras de celulose são discutidos, utilizando a metodologia do estudo de caso. Propõe-se um modelo de ciclo de vida para os biocompósitos no que diz respeito à matéria-prima, ao design de produto, à manufatura, à distribuição, ao consumo, à coleta e à reciclagem. A partir da avaliação de artigos científicos, relatórios de empresas de setores correlacionados com o tema, teses, e análises de mercado, cada uma das etapas do ciclo foi discutida separadamente. Buscou-se entender as particularidades de cada etapa do ciclo dos biocompósitos, e comparar pontos críticos desse modelo com aquele já desenvolvido para os polímeros unicamente produzidos a partir de fontes fósseis. Identificou-se que os biocompósitos estão em um estágio anterior quando se considera o grau de desenvolvimento da economia circular. Etapas como manufatura e reciclagem ainda carecem de um maior desenvolvimento tecnológico no sentido da criação e da otimização de processos para os biocompósitos. Contudo, os argumentos a favor da utilização de materiais de origem renovável vêm motivando o desenvolvimento de todas as etapas da economia circular para os biocompósitos. Incentivos por parte de instituições governamentais e não-governamentais impulsionam a mudança em uma direção que favorecem o aprimoramento desse ciclo. O presente trabalho contribui para a discussão acerca da economia circular mostrando pontos de atenção específicos do tema dentro de um contexto da utilização de biocompósitos como uma alternativa à materiais exclusivamente poliméricos, produzidos a partir de fontes não renováveis.

**Palavras-chave:** Economia-circular. Biocompósitos de celulose. Sustentabilidade. Materiais poliméricos.

## ABSTRACT

NARDI, R. A. R. **Cellulose biocomposites from circular economy perspective.** 2020. 42p. Trabalho de Conclusão de Curso – Escola de Engenharia de Lorena, Universidade de São Paulo, Lorena, 2020.

The growing concern about sustainability have been driving several sectors to rethink its products and processes. The sustainability concept is an important pilar that sustain a new way of staring the relationship between consumption and disposal: the circular economy model. Various segments of society have been contributing to optimize the useful life of resources, redefining the current meaning of waste. However, this transition must occur in a particular way for each link that makes up society, considering the necessities changes to adapt people, products, and processes. The polymer market was one of the pioneers of this discussion, and it is now necessary to extend it to one of its important derivatives: composites of renewable origin (or biocomposites). In this work, aspects related to the circular economy of biocomposites based on different polymeric matrices and reinforced with cellulose fibers are discussed, using the case study methodology. A life cycle model for biocomposites was proposed regarding to raw material, product design, manufacture, distribution, consumption, collection, and recycling. From the evaluation of scientific articles, reports, companies from sectors related to the theme, theses, and market analysis, all the stages of the cycle were separately discussed. It was sought to understand the particularities of each stage of the biocomposite cycle, and to compare critical points of this model with the one already developed for polymers produced exclusively from fossil sources. It was identified that biocomposites are at an earlier stage considering the degree of development of the circular economy. Stages such as manufacturing and recycling still need further technological development for creating and optimizing processes for biocomposites. However, the arguments that favor the use of materials of renewable origin have been motivating the development of all stages of the circular economy for biocomposites. Incentives by governmental and non-governmental institutions promote changes in a direction that benefit the improvement of the cycle. The present work contributes to the discussion about the circular economy, showing specific points of attention within the context of the use of biocomposites as an alternative to exclusively polymeric materials, produced from non-renewable sources.

**Keywords:** Circular economy. Cellulose biocomposites. Sustainability. Polymer materials.

## **SUMÁRIO**

1. INTRODUÇÃO .....	6
1.1 Contextualização e Justificativa.....	6
1.2 Objetivos .....	7
1.2.1 Objetivo Geral .....	7
1.2.2 Objetivos Específicos .....	7
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	8
2.1 A demanda global por sustentabilidade .....	8
2.2 A questão dos polímeros .....	9
2.3 Biocompósitos .....	10
2.4 A Economia Circular .....	13
3. MATERIAIS E MÉTODOS .....	17
4. DISCUSSÃO.....	18
4.1 Matéria-Prima .....	18
4.2 Design de Produto.....	21
4.3 Manufatura.....	25
4.4. Distribuição e Consumo.....	28
4.5 Coleta .....	29
4.6 Reciclagem.....	31
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	34
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	36

# 1. INTRODUÇÃO

## 1.1 Contextualização e justificativa

A crescente presença dos materiais compósitos de origem renovável em diversos produtos de uso cotidiano tem estimulado discussões a respeito do impacto que esse tipo de material exerce sob o meio ambiente. Esse debate se faz necessário pensando não apenas na urgência da questão ambiental, mas também na relevância do tema para o consumidor final, que valoriza cada vez mais as empresas que se preocupam com a sustentabilidade (MAINIERI et al., 1997; CHOI; NG, 2011; BUTLER, 2018; D'ANGELO, 2019). Adicionalmente, o sistema de produção ao qual a sociedade esteve inserida nas últimas décadas vem criando um cenário de geração de resíduos sem precedentes. Países asiáticos, que serviam de destino para os resíduos sólidos produzidos em todo o mundo, vêm impondo uma série de restrições nos últimos anos, o que está obrigando vários países a repensarem as suas práticas. Esses fatores fomentam o desenvolvimento da economia circular para os materiais de forma geral. Entretanto, até o presente momento, não há modelos que considerem as especificidades dos compósitos de origem renovável (também chamados de biocompósitos), em um contexto de economia circular.

O presente trabalho foi motivado pela forte tendência, por parte de empresas, pela prevenção dos possíveis impactos (ambientais e financeiros) relacionados à vida linear dos seus produtos. O entendimento da circularidade dos biocompósitos é importante pois há um grande apelo à substituição dos polímeros unicamente produzidos a partir de fontes fósseis por biocompósitos para a confecção de diferentes produtos.

## **1.2 Objetivos**

### **1.2.1 Objetivo Geral**

Como objetivo geral do trabalho buscou-se entender o modelo da economia circular, no que diz respeito à transição a partir de modelo linear, para biocompósitos baseados em celulose, comparando-o, em termos de nível de desenvolvimento, com os modelos já disponíveis e aplicados aos polímeros sintéticos (popularmente chamados de plásticos).

### **1.2.2 Objetivos Específicos**

- Apresentar o conceito de sustentabilidade e os impactos do uso e descarte indiscriminados dos materiais poliméricos;
- Apresentar o conceito de economia circular como opção sustentável para os materiais poliméricos;
- Definir os materiais compósitos de origem parcialmente renovável (reforçados com fibras celulósicas, aqui denominados biocompósitos);
- Avaliar como os biocompósitos se enquadram no presente momento em questões específicas presentes em cada elo da economia circular (matéria-prima, design de produto, manufatura, distribuição e consumo, coleta e reciclagem);
- Apresentar algumas perspectivas futuras para a implementação dos conceitos de economia circular aos produtos confeccionados a partir de biocompósitos.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 A demanda global por sustentabilidade

O termo “sustentabilidade” foi introduzido pela primeira vez em 1987 na Comissão Mundial de Meio Ambiente e Desenvolvimento (World Commission on Environment and Development) no “Relatório de Brundtland”, que ficou conhecido como “Nosso Futuro Comum”. Nesse documento, a sustentabilidade é definida como “a habilidade de satisfazer as necessidades do presente sem comprometer a capacidade das gerações futuras de atender as suas próprias necessidades” (JARVIE, 2016). Entretanto, desde o fim da década de 1960 e antes mesmo do termo ser definido, questões relacionadas ao meio ambiente já eram recorrentes, e o Clube de Roma, composto por personalidades influentes de diferentes espectros da sociedade, foi fundado para discuti-las (THE CLUB OF ROME, 2020). Desde então, várias foram as ocasiões em que grupos se reuniram para estabelecer objetivos para um desenvolvimento norteado pela conservação do meio ambiente. Ao longo dos anos, esses objetivos se tornaram mais ousados e as discussões se tornaram mais calorosas, à medida que o tema se tornava mais urgente. Alguns exemplos importantes ilustram esse cenário, como a Conferência de Estocolmo (1972), a Primeira Conferência Mundial do Clima (1979), o Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (1988), a Segunda Conferência Mundial do Clima (1990), ECO 92 (1992), Rio + 10 (2002) e Rio + 20 (2012) (QUADROS, 2018). Mais recentemente, alguns acordos mundiais estabeleceram metas globais para estimular os países a voltarem a atenção a questões ambientais. Desses, destacam-se o Protocolo de Quioto, o Acordo de Paris, e os Objetivos Globais. O Protocolo de Quioto, que trata mais especificamente da redução dos gases de efeito estufa (GEE) através de metas individuais atribuídas aos países desenvolvidos, falhou no seu primeiro prazo de compromisso (2008 a 2012) (UNITED NATIONS, 2013). O Acordo de Paris, por sua vez, trouxe em 2015 metas globais mais rigorosas a todos os países, e tem como principal objetivo limitar a elevação da temperatura do planeta. Outro conjunto importante de metas e objetivos, que expande o conceito da sustentabilidade para outros âmbitos da sociedade, são os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODSs), que foram assinados em 2015. Em texto composto por 169 metas e 17 objetivos, os ODSs estabelecem metas para 2030, juntamente com o Acordo de Paris (UNITED NATIONS, 2016).

Atualmente, muitas companhias apresentam os seus resultados de sustentabilidade em forma de relatórios anuais para clientes e investidores, uma vez que esse é um fator levado em conta para sua valorização. Concomitantemente, a sociedade tem avançado no sentido de valorizar a sustentabilidade, tomando consciência de quais são os principais danos que a sua forma de viver causa no planeta e quais são os caminhos que devem ser seguidos para minimizá-los (CHOI e NG, 2011). Nesse processo de conscientização, as pessoas costumam apontar algumas empresas, produtos e países como vilões da questão ambiental, o que é o caso, por exemplo, dos produtos baseados em polímeros (RHEIN e SCHMID, 2020).

## **2.2 A questão dos polímeros**

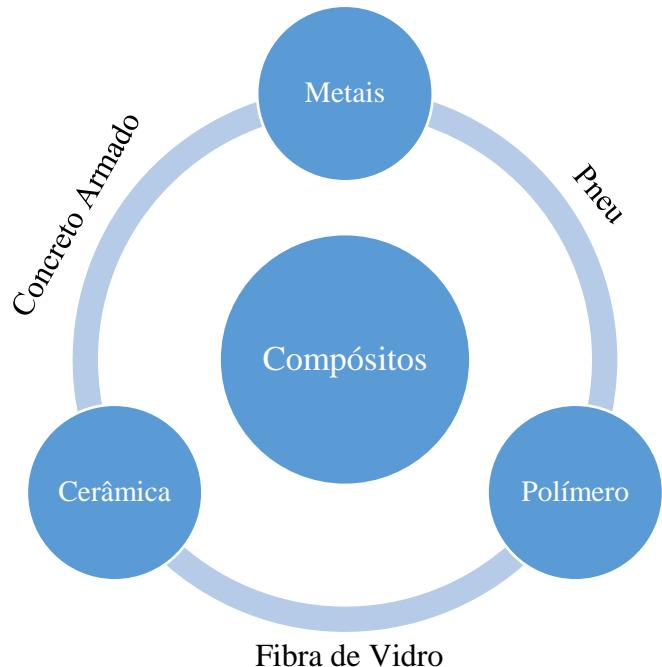
Os polímeros fazem parte da lista dos materiais que mudaram o modo de viver da humanidade, assim com o ferro, o bronze, o vidro e outros materiais. Enquanto desenvolviam-se técnicas para moldar os polímeros, eles moldaram por completo a sociedade nos últimos 100 anos e ajudaram a construir grande parte da história moderna. À medida que as tecnologias de produção avançaram e os tornaram mais acessíveis, os polímeros se fizeram presentes em diversos âmbitos da sociedade e hoje são indispensáveis. Entretanto, ocupam posição central no debate sobre cuidados com o meio ambiente. Na década de 1960 registrou-se pela primeira vez a presença de plásticos nos oceanos (SCIENCE HISTORY INSTITUTE, 2013), e hoje estima-se que 270 mil toneladas de objetos micrométricos e nanométricos (micro e nanoplásticos) estão nos oceanos e entram direta e indiretamente na cadeia alimentar de inúmeras espécies (LEGNAIOLI, 2018). Paralelamente, os polímeros são majoritariamente produzidos a partir de matérias-primas de origem fóssil, e mesmo que consumam uma pequena fração do petróleo (5 a 8 %), participam de todo o processo de extração e refino que, por si só, é bastante agressivo ao meio ambiente (WAKE, 2005; CERRI, 2011). Há também que se considerar os impactos sociais oriundos do depósito de polímeros nos bueiros e encanamentos, causando enchentes e grandes danos às cidades. Entretanto, apesar de todos esses malefícios, a questão dos efeitos dos polímeros no meio ambiente e na sociedade não é trivial. De acordo com a British Plastic Fundation (2019), as embalagens poliméricas são mais eficientes energeticamente e em termos de GEE que aquelas baseadas em outros materiais (BRITISH PLASTICS FEDERATION, 2015; ROYER et al.; UN ENVIRONMENT PROGRAMME, 2018).

O grande debate acerca do uso indiscriminado dos polímeros está centrado nos malefícios inquestionáveis de seu depósito e acumulação no meio ambiente (VOM SAAL et al., 2009). Nesse contexto, duas importantes abordagens são possíveis. A primeira é o uso de materiais que possam substituir os polímeros sintéticos de fontes fósseis e causar menos danos ao meio ambiente; a segunda é a transformação dos resíduos poliméricos em novas matérias-primas, o que se insere no contexto de economia circular (GU, GUO, et al., 2017; HOTTLE, BILEC e LANDIS, 2013). No presente trabalho propõe-se contextualizar e aprofundar o conhecimento acerca desses dois pontos e discuti-los para o caso específico de biocompósitos baseados em celulose.

### **2.3 Biocompósitos**

Os compósitos são uma classe de materiais de engenharia, e podem ser definidos como a combinação de dois ou mais componentes a fim de gerar um novo material com propriedades distintas daquelas apresentadas individualmente pelos componentes de origem (Figura 1). Esses componentes são chamados de matriz e de reforço (ou de fase contínua e de fase dispersa, respectivamente), e podem estar associados de diferentes formas para constituir a estrutura do material final. Vários tipos de materiais podem ser empregados em uma dessas fases, e alguns exemplos são vistos na natureza: a madeira (fibra de celulose, hemiceluloses e lignina), os ossos (colágeno e hidroxiapatita) e as conchas (carbonato de cálcio e proteínas). No contexto da Engenharia de Materiais, as matrizes mais comuns são os metais, as cerâmicas e os polímeros, enquanto os reforços podem ser de fibras naturais ou sintéticas, polímeros, minerais, metais, cerâmicas, entre outros.

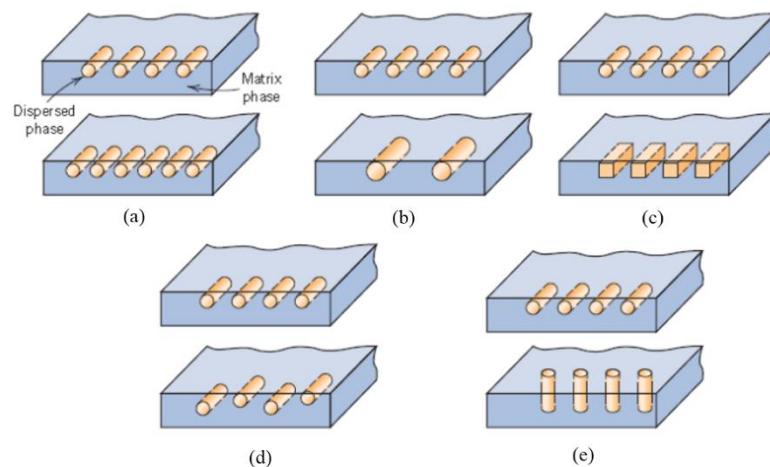
Figura 1 - Materiais Compósitos



**Fonte:** O próprio autor

Os tipos de materiais que constituem os compósitos não são os únicos determinantes de suas propriedades, devendo-se levar em conta também o tipo de estrutura do material de reforço e quais as características de sua conformação na matriz. Em relação à conformação, características como concentração, tamanho, geometria, distribuição e orientação do reforço têm papel fundamental nas propriedades do compósito (Figura 2) (CALLISTER, 2002).

Figura 2 - Diferentes geometrias do reforço na matriz: (a): concentração; (b): tamanho; (c): geometria; (d): distribuição; (e): orientação



**Fonte:** CALLISTER (2002, p. 360)

No que diz respeito ao tipo de estrutura, os reforços dividem-se em estruturais, particulados e fibrosos. Os compósitos estruturais são constituídos de materiais compósitos e de materiais homogêneos (não-compósitos). As suas propriedades dependem não só das características dos materiais que os compõe, mas também da maneira como estes são dispostos geometricamente para a formação da estrutura final. Alguns exemplos desse tipo de compósito são telhados, pisos, paredes, e asas de aeronaves. Os compósitos reforçados por partículas podem ter suas propriedades resultantes de interação matriz-reforço a nível molecular, quando são utilizadas partículas com diâmetro médio entre 0,01 e 0,1 µm (reforço por dispersão), ou podem sofrer influência de partículas maiores (reforço por partículas grandes). Pode-se citar como exemplo o concreto, a borracha de pneu e as ligas de níquel com óxido de tório. Os compósitos reforçados por fibras constituem a classe mais comum entre os materiais compósitos devido às excelentes propriedades mecânicas e ao baixo peso das fibras (SAHEB e JOG, 1999). Aqui, destacam-se os compósitos reforçados por fibras de vidro, de carbono, Kevlar® e outras aramidas, e fibras naturais (CALLISTER, 2002).

A utilização de um componente proveniente de fonte renovável como matriz ou reforço dá origem à subcategoria dos *biocompósitos*. Existem várias possibilidades de utilização de componentes naturais para formar os biocompósitos. Pode-se utilizar, por exemplo, polímeros naturalmente disponíveis ou seus derivados, como glúten, quitina e quitosana, colágeno (SWETHA et al., 2010; MUNEER, 2015), fibras naturais de origem animal, vegetal ou mineral, entre outros (RAMAMOORTHY; SKRIFVARS; PERSSON, 2015).

Nesse sentido, uma opção bastante promissora são as fibras de origem vegetal (ou lignocelulósicas), que correspondem a uma matéria-prima biodegradável, renovável, abundante, altamente disponível, e que apresentam excelentes propriedades mecânicas (LUZ, 2008; RAMIRES, 2010; HUBER et al., 2012). É importante destacar que os biocompósitos aparecem não só como uma alternativa ao uso dos polímeros no que diz respeito às questões ambientais, mas também como materiais economicamente promissores e com propriedades específicas (MAYA; SABU, 2008).

## 2.4 A Economia Circular

Atualmente, discussões que têm como pauta a urgência por mudanças significativas na maneira como a sociedade vive e se organiza são cada vez mais frequentes. A atual linearidade da economia vem produzindo um fluxo unidirecional de transformação de recurso em resíduo, que se acentuou no momento em que as relações da sociedade de consumo como a conhecemos hoje foram estabelecidas (CROCKER, 2018). De acordo com Baudrillard (1970), trata-se de uma sociedade que valoriza mais o sentimento por trás do consumo do objeto do que o objeto em si.

De acordo com Circle Economy (2019), mais de 90,9% da economia atual é linear, e esse fato vem criando, ao longo dos anos pós-revolução industrial, uma sociedade que tem que lidar com uma quantidade de resíduos sem precedentes. O referido relatório mostra também o crescimento na demanda por matérias-primas para suprir as necessidades da sociedade. Nos últimos quarenta anos, o consumo de recursos da natureza aumentou quase três vezes, e essa taxa de crescimento está em ascensão. Estima-se que em 2050 a demanda por recursos irá atingir entre 170 e 184 bilhões de toneladas, o que representa aproximadamente o dobro do valor atual. Isso quer dizer que a quantidade de resíduos também irá aumentar de forma acelerada. Em 2020, novos dados a respeito da circularidade do planeta mostraram um número atualizado, ainda maior, para a linearidade da economia (91,4%). Três motivos são apontados como a causa desse elevado número (CIRCLE ECONOMY, 2020):

**Altas taxas de extração de materiais:** grande parte dos materiais extraídos é não-reciclável e não-renovável – por exemplo, os combustíveis provenientes de fontes fósseis;

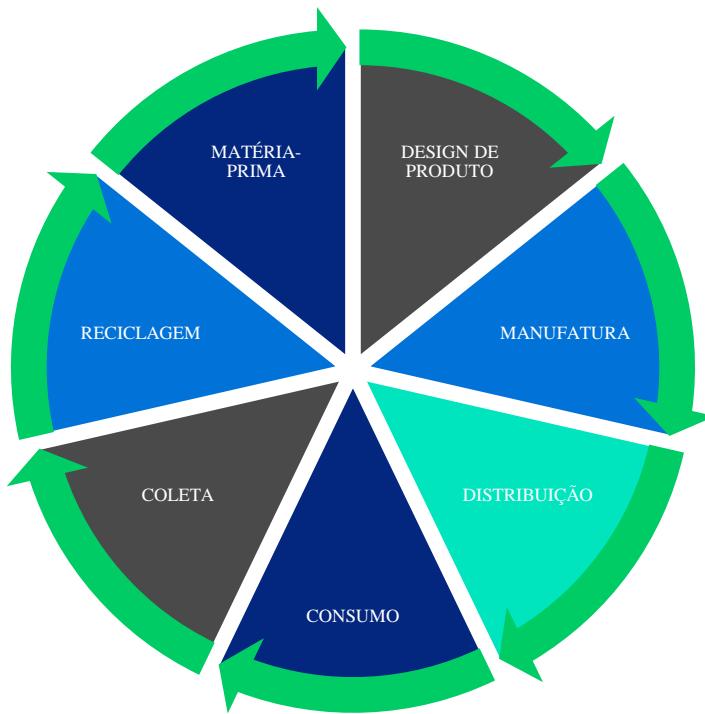
**Acúmulo contínuo de estoque:** o setor de construção civil demanda grande quantidade de material e de estoque, principalmente levando em consideração o aumento recente da urbanização em países como a China (ZEIDAN, 2019). Cerca de 52% dos materiais que entram na economia são de vida curta (52,6 bilhões de toneladas), os outros 48% são duráveis (48 bilhões de toneladas) (BAKKER et al., 2014; HAFFMANS, 2018; WIEDENHOFER et al., 2019).

**Aumento lento do processamento de final de vida e reuso:** em algumas partes do mundo as taxas de recuperação estão aumentando, e apesar de existirem melhorias nos números de reciclagem, há também um aumento contínuo na produção de novos

materiais. Além disso, a produção de materiais reciclados não é suficientemente grande para suprir as necessidades do crescimento da sociedade.

Nesse contexto, a economia circular pode ser considerada uma expansão dos quatro R's da sustentabilidade (repensar, reduzir, reutilizar e reciclar) (INTERNATIONAL INSTITUTE FOR SUSTAINABLE DEVELOPMENT, 2013), e a maneira a partir da qual os recursos podem ser otimizados. No modelo linear, há um fluxo unidirecional de energia que se encaminha para um único fim, com perda de recursos ao longo das etapas. Por exemplo, todo recurso utilizado (matéria-prima, mão de obra, energia) desde a fabricação do produto até o consumidor é perdida quando o produto chega ao fim da cadeia linear. A otimização de recursos proposta pela economia circular visa minimizar essas perdas simultaneamente em todas as etapas do ciclo de vida de um produto (matéria-prima, design de produto, manufatura, distribuição, consumo, coleta, reciclagem) (ZINK e GEYER, 2017) (Figura 3).

Figura 3 - Ciclo de Vida de um Produto



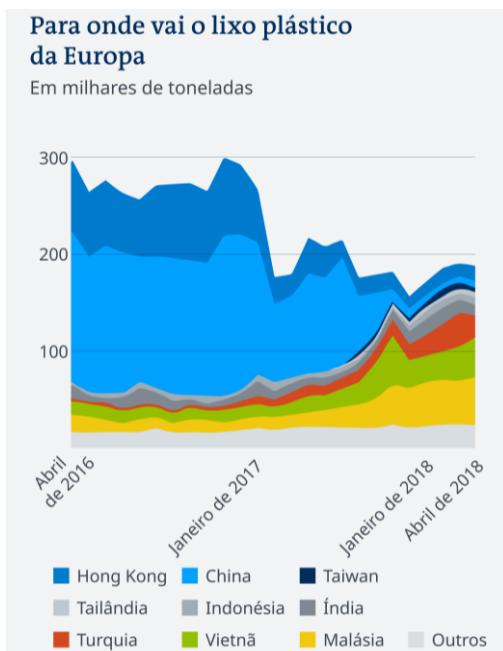
**Fonte:** O próprio autor

O conceito de economia circular vem sendo extensivamente abordado na literatura recente. Entretanto, possui diferentes interpretações. Kirchher et al. (2017)

analisaram 114 definições para o termo “economia circular” e observaram que a combinação das palavras reduzir, reciclar e reutilizar são frequentemente utilizadas para descrever a economia circular, e que os trabalhos relacionados com esse tema apontam sempre para questões como a prosperidade econômica e a qualidade ambiental. Apesar disso, alguns pontos importantes não são comumente associados à economia circular, como por exemplo, a necessidade de uma mudança sistemática para permitir que a transição aconteça, e os impactos sociais que as próximas gerações sentirão com o avanço desse conceito. Existem ainda discussões a respeito de como esse tema se diferencia conceitualmente de sustentabilidade. Enquanto a sustentabilidade pode ser vista como um termo subjetivo e de difícil aplicabilidade, a economia circular tem definições concretas que fornecem direções claras para a sua implementação (GEISSDOERFER et al., 2017).

No contexto geopolítico, a economia circular se torna importante por questões que vão além da sustentabilidade. Até 2017 a China era responsável por importar mais da metade dos resíduos poliméricos do mundo, que eram usados como energia para suas indústrias através de reciclagem energética. Porém, a sobrecarga de resíduos e a poluição gerada pelas usinas de reciclagem fizeram o país começar a adotar medidas que dificultaram a exportação por parte de outros países do mundo. Hoje, o volume de resíduos produzidos internamente na China já é suficiente para abastecer as suas usinas de reciclagem. Essa medida obrigou os outros países a repensarem as tratativas dos seus resíduos (Figura 4). Um exemplo disso são as legislações aprovadas na União Europeia, que proíbem o uso de produtos poliméricos descartáveis a partir de 2021, e que colocam objetivos ambiciosos em relação à reciclagem (90% das garrafas plásticas terão que ser recicladas até 2029, e sua composição deverá ter 25% de material reciclado até 2030) (WELLE, 2019). As importações chinesas de resíduos caíram 46,5% de 2017 para 2018, e a expectativa do governo chinês é de zerar esse número nos próximos anos (SCHAUENBERG, 2019). Esse é mais um fator que eleva ainda mais a importância da economia circular no cenário atual, em que todas as empresas começam a repensar a maneira de fazer a transição para a circularidade dos seus produtos e processos.

Figura 4 - Importação mundial de lixo entre abril de 2016 e abril de 2018



**Fonte:** ©DW (2019)

### **3. MATERIAIS E MÉTODOS**

Considerando a contemporaneidade do tema, e o aspecto de investigação empírica de informações, o trabalho foi desenvolvido pela metodologia do estudo de caso (YIN, 2001). O trabalho foi dividido de forma a analisar separadamente cada uma das etapas do ciclo proposto na Figura 3 (matéria-prima, design de produto, manufatura, distribuição e consumo, coleta e reciclagem). Para a discussão do assunto de forma geral, o estudo de caso se baseou na temática da economia circular para os materiais poliméricos, compósitos e biocompósitos de qualquer natureza. Contudo, para o entendimento mais aprofundado de alguns tópicos, o trabalho focou no caso particular dos biocompósitos baseados em fibras de celulose. Fez-se o uso de ferramentas de busca especializadas para encontrar trabalhos que embasassem as discussões. Foram utilizados artigos científicos publicados em revistas de diferentes áreas (ciências dos materiais, polímeros, sustentabilidade, reciclagem, celulose etc.), teses, capítulos de livros, e relatórios de instituições de análise de mercado e de organizações nacionais e internacionais, como o Ministério do Meio Ambiente, ONU e União Europeia.

## 4. DISCUSSÃO

A discussão sobre a economia circular para os biocompósitos passa por todas as etapas do ciclo, sendo: matéria-prima, design de produto, manufatura, distribuição e consumo, coleta e reciclagem. O estudo de caso trouxe especificidades de cada uma das etapas, dando ênfase para os biocompósitos baseados em fibras de celulose, sempre que possível.

### 4.1 Matéria-Prima

Primeiramente, é preciso apresentar o contexto ambiental das matérias-primas que constituirão o produto em questão. A maior parte dos materiais poliméricos é produzida a partir do petróleo, que tem nas etapas de extração de matéria-prima, refino, transporte e transformação uma grande geração de gases de efeito estufa. Entretanto, a análise do impacto ambiental gerado como consequência da substituição de uma fração de material polímerico por fibras naturais não é trivial, uma vez que depende de diversos fatores que se estendem por toda a cadeia de suprimentos (HELBIG et al., 2017). Essa complexidade pode ser exemplificada para o caso dos impactos da utilização de biocompósitos na indústria automotiva. O fato de serem materiais mais leves faz com que gerem uma melhora na eficiência energética dos automóveis em comparação aos componentes tradicionalmente utilizados, e isso se reflete também na redução da geração dos gases de efeito estufa. Para aplicações na indústria automotiva, Boland et al. (2016) mostraram que a utilização de biocompósitos reforçados com fibras de celulose resultou em uma economia energética de 6,5% a 16,4%, além de uma redução na emissão de gases de efeito estufa próxima de 16%.

A análise do ciclo de vida, que corresponde a uma ferramenta útil para explicar como a seleção de determinado material impacta na pegada de carbono de um produto, torna-se importante nesse contexto. Joshi et al. (2004) desenvolveram um trabalho baseado na análise de diferentes estudos sobre ciclo de vida para mostrar os impactos ambientais causados pela utilização de compósitos reforçados com fibras naturais (caniço e cânhamo) em substituição àqueles reforçados por fibra de vidro. Os autores mostraram que, em geral, os compósitos reforçados com fibras naturais (biocompósitos) precisam de um conteúdo maior de fibra do que aqueles reforçados com fibras de vidro para atingir propriedades similares, o que reduz a quantidade total de polímeros sintéticos empregado em um determinado material. Além disso, o compósitos reforçados por fibras naturais

tendem a ser mais leves, resultando em uma redução no consumo energético gerado pela sua utilização. A utilização de fibras naturais como reforço, portanto, tende a criar materiais com menor impacto ambiental durante o ciclo de vida. Contudo, os aspectos ambientais dos compósitos reforçados por fibras naturais podem ser reduzidos caso os produtos baseados nesse tipo de material tenham uma vida operacional menor do que os produtos baseados em compósitos reforçados por fibras de vidro.

O trabalho de Correa et al. (2019) apresenta uma análise da pegada de carbono de algumas etapas do ciclo de vida de biocompósitos reforçados com fibra de kenaf, que também é conhecida no Brasil como cânhamo rosella, uma planta que pertence ao gênero *Hibiscus* e que vem sendo explorada para aplicações em biocompósitos (BHATTACHARYYA; SUBASINGHE; KIM, 2015). No referido trabalho, os autores apresentam os resultados de uma avaliação quantitativa desenvolvida para comparar a pegada de carbono de biocompósitos e de polímeros tradicionais, levando em consideração os aspectos referentes às matérias-primas, transporte e processamento para três cenários de biocompósitos com matriz de polipropileno (PP) reforçada com fibras de kenaf.

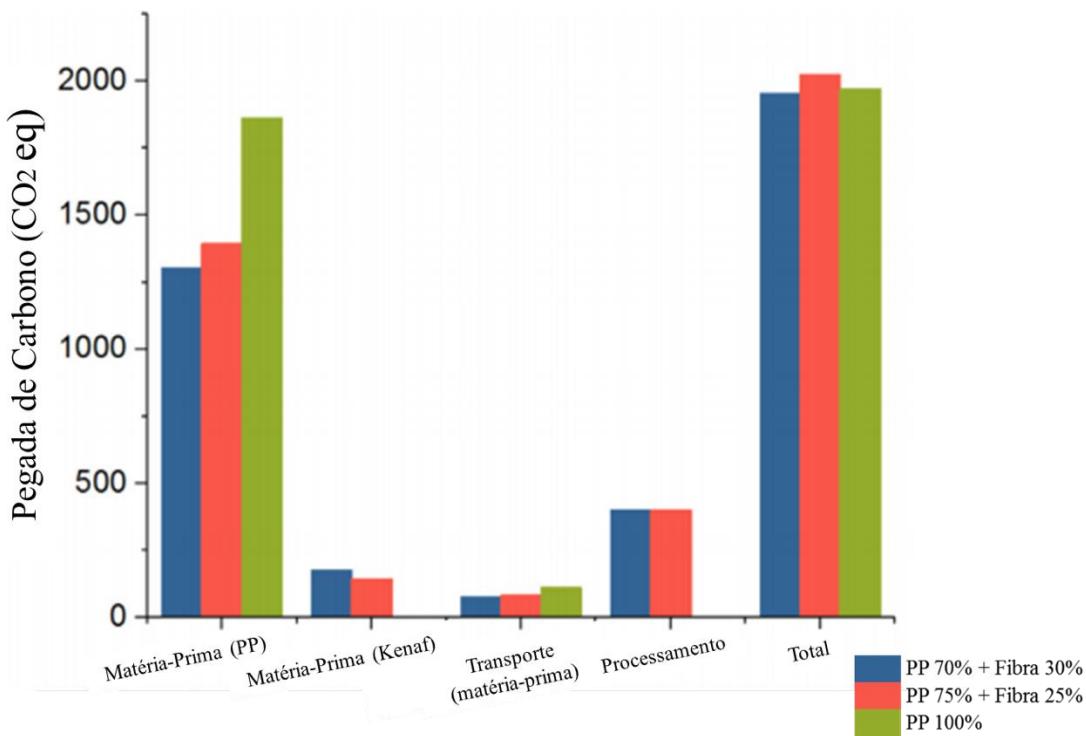
Cenário 1 – 100% PP

Cenário 2 – 75% de PP + 25% de fibra (biocompósito 25%)

Cenário 3 – 70% de PP + 30% de fibra (biocompósito 30%)

Para os três cenários os autores consideraram como consumidor final a empresa responsável pela manufatura do produto. No Cenário 1 avaliou-se tanto a produção de matéria-prima quanto o transporte até o consumidor final (foi considerada uma distância de 419,2 km). Nos Cenários 2 e 3 a produção e o transporte das fibras (12 km de distância até o consumidor final) foram adicionados à avaliação da matéria-prima, e considerou-se também o processamento desses materiais, ou seja, as etapas de secagem e incorporação para a produção de pellets.

Figura 5 - Pegada de carbono para PP, biocompósito 25% e biocompósito 30%



**Fonte:** Adaptado de CORREA et al., 2019.

No Cenário 2, observou-se que a incorporação das fibras levou a um aumento de 2,62% da pegada de carbono (Figura 5). Entretanto, é importante notar o impacto que os biocompósitos têm na etapa de produção de matéria-prima, em que a adição de fibras permitiu uma redução de 24% da pegada de carbono devido à redução na quantidade de polímero produzido. Mesmo somando-se o valor da pegada de carbono gerado na produção e no transporte das fibras ao valor da matéria-prima dos biocompósitos, o número ainda é menor do que a pegada de carbono associada à matéria-prima do polipropileno puro. Em relação à redução do custo de transporte, os biocompósitos apresentam um valor menor na pegada de carbono do que o polipropileno puro porque eles reduzem a quantidade de polipropileno que tem que ser transportado por uma grande distância. Além disso, utilizou-se fibras naturais que ficam próximas ao local de produção dos materiais.

Um ponto bastante importante que deve ser levado em consideração é a necessidade de uma etapa adicional de processamento para misturar as fibras com o polímero, o que gera uma quantidade extra de carbono liberado na atmosfera e é o principal motivo que causa o aumento da pegada de carbono dos biocompósitos. Vale

notar, entretanto, que quando se utiliza 30% de fibras no material final (Cenário 3), a pegada de carbono é reduzida em 0,9% (CORREA et al, 2019).

A avaliação apresentada por Correa et al. (2019) foi conduzida no estilo “cradle to gate”, ou seja, considerando apenas a produção do PP e dos biocompósitos enquanto matérias primas para outros produtos. A análise do ciclo de vida não foi feita para os produtos acabados. Questões como redução de peso e melhora de propriedades mecânicas, podem favorecer os bicomponentes dependendo da aplicação. Por outro lado, em uma avaliação de produto acabado, há também pontos que podem favorecer a pegada de carbono dos produtos exclusivamente sintéticos como, por exemplo, o maior grau de maturidade tecnológica do processamento e da reciclagem. As técnicas de processamento dos biocompósitos apresentam um grau de otimização de recursos (matérias-primas e energia) menor do que aquelas utilizadas para o processamento dos polímeros sintéticos, conforme apresentado por Vidal, Martínez e Garraín (2009). Além do mais, a questão da distância entre o produtor da matéria-prima (polímeros e fibras) e a fábrica onde os produtos serão produzidos ou distribuídos também deve ser considerada. O estudo levou em consideração o cenário em que ambas as matérias-primas são produzidas dentro de um mesmo país, e um cenário diferente (em que o PP deve ser importado, por exemplo), os resultados seriam muito diferentes.

Um ponto fundamental que não foi considerado no estudo apresentado é a redução de carbono que a própria matéria-prima das fibras de celulose (a madeira) gera. Atualmente, as indústrias florestais ocupam posição de destaque no contrabalanceamento do carbono na atmosfera, gerando o que se chama de créditos de carbono (GAAST; SIKKEMA; VOHRER, 2016). Para o cálculo dos impactos ambientais dos biocompósitos, essa consideração é de extrema relevância.

## 4.2 Design de Produto

O design de produto é fundamental para todas as outras etapas do ciclo. O projeto de um produto que seja feito para uma economia circular deve levar em consideração as especificidades de cada tipo de material para as tratativas corretas em todas as etapas. Entretanto, devido ao fato de as discussões sobre design para economia circular serem relativamente recentes, alguns termos e definições ainda carecem de esclarecimentos. Nesse sentido, Den Hollander, Bakker e Hultink (2017) propuseram uma discussão a respeito do design de produtos para a economia circular, pautada na redefinição de

termos. Os autores defendem que o chamado design ecológico, ou “ecodesign”, e o design para economia circular diferem em um nível fundamental.

Os princípios do ecodesign são estabelecidos na economia linear e, portanto, precisam de adaptações para o design para economia circular. Um exemplo da aplicação dos princípios do ecodesign é o trabalho de Luz et al. (2012), que avalia os impactos técnicos e ambientais da utilização de fibras de cana-de-açúcar como reforço para matriz de polipropileno. Nesse trabalho, os autores propuseram como opções de fim de vida para os biocompósitos a incineração, a reciclagem e a disposição em aterros, o que se insere no conceito de economia linear.

Um dos fundamentos do ecodesign é a hierarquia do lixo proposta pela Diretiva Europeia de Resíduos (EUROPEAN COMMISSION, 2009) que prioriza, nessa ordem, a prevenção de geração, o reuso, a reciclagem, outras formas de recuperação, e a disposição em aterros. Para o ecodesign o objetivo é priorizar sempre o nível mais alto possível da hierarquia do lixo. Entretanto, a definição tradicional desses termos (prevenção, reuso, reciclagem, disposição) perde o sentido no contexto de economia circular, em que fundamentalmente não existe lixo. A partir dessa diferenciação, pode-se fazer algumas novas definições para o design circular, sendo a primeira delas relativa ao tempo de vida. Geralmente esse termo está atrelado à funcionalidade do produto, o que não é uma boa definição para o design circular pois há produtos que são descartados ainda em estado funcional, e há produtos que podem não estar sendo utilizados mas ainda assim não serão descartados (e.g., uma bicicleta com pneu furado não está em um estado funcional, mas também não está em seu fim de vida). Para o design circular o tempo de vida pode ser definido em termos da obsolescência de um produto, ou seja, o momento a partir do qual o produto não é mais considerado útil ou significante para os usuários. Diferentemente da funcionalidade, a obsolescência está relacionada com a perda de valor perceptível, e é um indicador mais representativo para o design circular. Além disso, a obsolescência não é necessariamente o estado final do produto, e pode ser revertida. Os objetivos do design circular são (i) evitar que os produtos ou os seus componentes escapem da economia circular de tal forma que não possam ser recuperados, e (ii) recuperar os componentes que por algum motivo estão fora do ciclo, em estado de obsolescência, mas que possuem potencial para serem recuperados (DEN HOLLANDER; BAKKER; HULTINK, 2017).

O design circular deve manter o produto próximo do seu estado original pelo máximo de tempo possível, seguindo o que Walter Stahel (2010, p. 195) chama de Princípio da Inércia, que é definido da seguinte maneira: “Não repare o que não está quebrado, não faça a remanufatura de algo que pode ser reparado, e não recicle um produto que pode ser remanufaturado. Substitua ou trate apenas a menor parte possível, a fim de manter o valor econômico do sistema.”

Seguindo esse princípio, o design circular deve ser elaborado primeiramente de forma a garantir que os produtos se mantenham em seu estado de integridade pelo máximo de tempo possível, ou seja, prevenir o seu estado de obsolescência. E, de forma secundária, deve ser desenhado para que as matérias-primas que compõe o produto possam ser recicladas da forma mais eficiente possível. Os aspectos relacionados à reciclagem serão desenvolvidos em mais detalhes em seção posterior.

Den Hollander, Bakker e Hultink (2017) sugerem que o design circular para manter a integridade do produto pode ser abordado de três formas diferentes: design para prevenção, design para postergação, e design para recuperação. O design de prevenção dá ao produto resistência ao estado de obsolescência, e permite que ele seja utilizado por um longo tempo. Essa prevenção acontece no aspecto físico (ou seja, o produto tem que ser projetado de modo que tenha a sua integridade garantida por um longo tempo de uso), e no aspecto das sensações, para que os consumidores não descartem o produto por motivos emocionais. Um exemplo desse tipo de design pode ser um par de botas de couro, que sejam resistentes, e muito confortáveis. O design de postergação permite que o ciclo de vida do produto seja estendido, por meio de manutenção constante e upgrades. Por exemplo, as botas de couro passarem por processos de polimentos (manutenção constante), ou modificações para adaptar o produto para um usuário diferente (upgrade). Para facilitar a recuperação, ou seja, reverter o estado de obsolescência o design pode criar produtos que sejam fáceis de ser reparados ou restaurados, como por exemplo, um buraco numa bota de couro, que pode ser facilmente reparado por um sapateiro.

De forma similar, Bocken et al. (2016) apresentam conceitos de design circular que são construídos baseados em três principais estratégias: i) retardar o final do ciclo de um produto; ii) fechar o ciclo, permitindo que o resíduo volte a ser matéria-prima; iii) otimizar os recursos que são utilizados para produção dos produtos. Essas estratégias são expandidas pelos autores conforme a Tabela 1

Tabela 1 - Estratégias para construção do design circular

<b>Estratégias para retardar o final do ciclo de um produto</b>
Design para apego e confiança
Design para durabilidade
Design para manutenção e reparo
Design para adaptação e atualização
Design para padronização e compatibilidade
Design para montagem e desmontagem
<b>Estratégias para fechar o ciclo</b>
Design para um ciclo tecnológico
Design para um ciclo biológico
Design para montagem e desmontagem

Fonte: Bocken et al. (2016), adaptado.

Vários pontos levantados por Bocken et al. (2016) se assemelham com os conceitos trazidos por Den Hollander, Bakker e Hultink (2017), sobretudo quando são apresentadas as estratégias para retardar o final do ciclo de um produto. Garantir que o produto possua características como apego (no sentido de emoções e sensações), elevada durabilidade, facilidade de manutenção e atualização, são as estratégias que Den Hollander, Bakker e Hultink (2017) chamam de design para prevenção e postergação. Adicionalmente, Bocken et al. (2016) trazem três estratégias de design circular voltadas especificamente para fechar o ciclo de um produto: design para um ciclo tecnológico, design para um ciclo biológico, e design para montagem e desmontagem. O design para um ciclo tecnológico tem como objetivo permitir uma reciclagem de tal forma que se possa obter novos materiais com propriedades semelhantes às das matérias-primas virgens. Design para um ciclo biológico está atrelado a produtos que são consumidos ou desgastados durante o uso, de forma que os recursos não são dissipados. O intuito dessa estratégia é desenvolver produtos biodegradáveis que possam alimentar ciclos naturais (como por exemplo, a compostagem). O design para a montagem e desmontagem, por sua vez, tem como objetivo garantir que as partes que compõem um determinado produto possam ser facilmente separadas e posteriormente encaminhadas para os ciclos corretos.

No que diz respeito a toda a gama de produtos que podem ser produzidos a partir de biocompósitos de celulose, é necessário que se incluam, no design de produto, estratégias que sejam construídas tendo como base conceitos da economia circular. Um exemplo de design para integridade (ou design para retardar o final do ciclo) aplicado ao

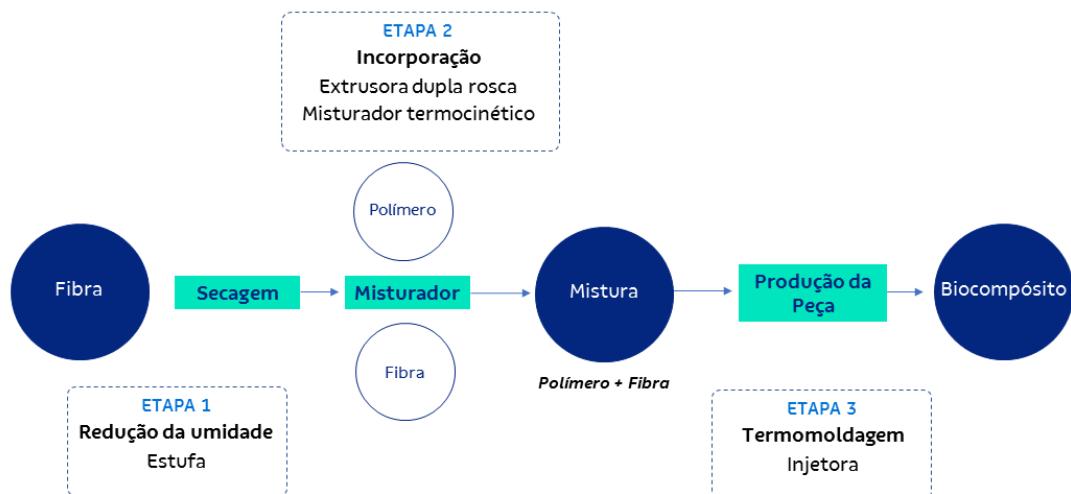
biocompósitos de celulose seria o de um produto que fosse projetado para aplicações que estivessem abaixo da temperatura de degradação de celulose (SZCZESNIAK; RACHOCKI; TRITT-GOC, 2008).

#### **4.3 Manufatura**

A manufatura dos biocompósitos no contexto da economia circular pode ser discutida de duas maneiras diferentes. A primeira delas é baseada no processo comum de produção de biocompósitos, a partir de matérias-primas virgens. A segunda abordagem é baseada em materiais que já passaram pelo menos uma vez pelo ciclo, ou seja, materiais reciclados.

Para a produção de biocompósitos a partir de matérias-primas virgens, às mesmas técnicas utilizadas para a fabricação de plásticos e compósitos convencionais (NAGALAKSHMAIAH et al., 2019) são adicionadas etapas específicas. A produção de biocompósitos é dividida, na maior parte dos casos, em três etapas: remoção da água da matéria-prima fibrosa, processo de mistura entre as fibras e o polímero (matriz), e produção da peça ou corpo de prova (Figura 6). A evaporação de água da fibra antes do processamento é essencial porque a presença de água age como um agente de descolamento na superfície polímero-fibra. Além disso, a evaporação de água durante o processamento do material (extrusão ou injeção) pode gerar vazios dentro da matriz, o que gera um impacto negativo nas propriedades mecânicas do material produzido (GURUNATHAN et al., 2015). A etapa de mistura é utilizada para a incorporação das fibras na matriz polimérica, de forma a produzir um material concentrado em fibras que pode ser posteriormente utilizado para diluição, adicionando-se mais polímero, para a produção de peças ou corpos de prova. Exemplos de equipamentos que são utilizados para a etapa de mistura das fibras e polímeros são a extrusora dupla rosca e misturador termocinético (LUZ, 2008). As características das misturas provenientes desses processos dependem de uma série fatores, como por exemplo, da eficiência da secagem das fibras, do controle dos parâmetros de processo e da interação superficial entre as fibras e a matriz polimérica. A terceira etapa consiste na produção da peça, que acontece quando o material produzido na etapa anterior é processado.

Figura 6 – Esquema geral de produção de biocompósitos



Fonte: Próprio Autor

Todas essas etapas sofrem influência de uma série de variáveis (equipamentos e técnicas diferentes, parâmetros de controle, experiência dos operadores, aspectos das matérias-primas, concentrações, etc.) e, portanto, é necessário que a eficiência do processo seja monitorada. Um método que não esteja bem desenvolvido para a produção dos biocompósitos, em qualquer uma das etapas, pode gerar materiais que tenham propriedades prejudicadas, e isso se reflete diretamente no tempo de vida dos biocompósitos no contexto da economia circular. Conforme discutido anteriormente, um ponto importante para a manutenção de um determinado produto dentro da economia circular é sua capacidade de se manter íntegro em vários ciclos de vida consecutivos.

Com relação à abordagem de reciclagem, muitos autores utilizam os conceitos de reprocessamento e reciclagem de forma unificada, contudo existem diferenças que devem ser levadas em consideração e que serão explicadas a seguir por meio de exemplos. Um exemplo do reprocessamento de materiais é apresentado por Leão et al. (2015). Nesse trabalho, os autores utilizaram o processo de mistura termocinética seguida de injeção para comparar as propriedades de biocompósitos obtidos a partir de matérias-primas virgens (polipropileno reforçado com fibras de cana-de-açúcar) com as propriedades de biocompósitos preparados a partir de materiais que já haviam sido processados, e foram em seguida moídos e reprocessados. Os biocompósitos reprocessados apresentaram propriedades mecânicas inferiores quando comparados àqueles produzidos a partir de matérias-primas virgens. Bourmaud e Baley (2017), por outro lado, não identificaram mudanças significativas nas propriedades mecânicas de biocompósitos reprocessados

reforçados com fibras de cânhamo e sisal, e verificaram alterações nos valores de viscosidade que foram explicadas pela redução no comprimento das fibras e massa molecular após sequências de reprocessamentos.

Grande parte dos estudos não reproduz com fidelidade as condições reais dos materiais reciclados, e tratam o reprocessamento (pré-consumo) e a reciclagem (pós-consumo) de forma única, conforme foi comentado anteriormente. Entretanto, os materiais que voltam novamente para a etapa de manufatura depois de terem passado pelo ciclo de uma economia circular não se encontram da mesma forma que aqueles que são utilizados em testes de reprocessamento, devido a fatores como diferentes formas de degradação ou contaminação por outros materiais. A Diretoria Geral do Meio Ambiente da União Europeia (2011) define resíduo pré-consumo no relatório intitulado “Lixo plástico no meio ambiente” como “resíduo industrial, referente a resíduos gerados durante os processamentos de conversão ou fabricação”, e resíduo pós-consumo como “resíduos produzidos pelos consumidores dos materiais”. Um exemplo da diferença entre as duas abordagens é apresentado no trabalho de Yarahmadi, Jakubowicz, Enebro (2016), em que foi verificado o efeito da reciclagem (pós-consumo) e do reprocessamento (pré-consumo) em poli (ácido lático) (PLA) virgem e em duas blendas comerciais de PLA com policarbonato e com polietileno. Os autores utilizaram um método de envelhecimento acelerado para representar os materiais reciclados, e mostraram que as blendas sofreram efeitos severos de degradação, diferentemente dos materiais que foram apenas reprocessados. Spadetti et al. (2017) é um exemplo de trabalho que mostra o efeito da utilização de materiais reciclados (pós-consumo) para a produção de biocompósitos. Nesse trabalho verificou-se que rigidez dos biocompósitos produzidos a partir de polipropileno reciclado é inferior quando comparada com aqueles produzidos a partir de polipropileno virgem, ambos utilizando fibras de celulose como reforço. Os autores identificaram que o polipropileno reciclado que foi utilizado possuía uma contaminação de poliestireno, e atribuíram a este fato as diferenças nas propriedades. Ambos os trabalhos, portanto, mostraram que os materiais reciclados sofrem efeitos de degradação e contaminação, de forma como não acontece com materiais que são apenas reprocessados.

O trabalho Spadetti et al. (2017), mesmo apresentando uma abordagem mais precisa do que seria a reciclagem no contexto da economia circular, utiliza apenas polipropileno reciclado. O efeito adicional da utilização das fibras de celulose recicladas

não foi verificado. A etapa de reciclagem é de extrema importância para a viabilidade da economia circular dos biocompósitos, e será discutida em mais detalhes em seção posterior.

#### **4.4. Distribuição e Consumo**

O sucesso da circularidade de um produto depende de inúmeros fatores. Obviamente a natureza do produto é um fator predominante nesse sentido. Por exemplo, embalagens, peças de automóveis, componentes de dispositivos eletrônicos, e qualquer outro produto que seja confeccionado a partir de biocompósitos, terão uma leitura diferente dentro da economia circular. Outro fator importante é o mercado no qual será distribuído e comercializado, já que o grau de desenvolvimento de cada elo do ciclo (disponibilidade de matérias-primas, design de produto, manufatura, coleta e reciclagem) é diferente em cada região. A taxa de crescimento anual composta entre 2017 e 2022 do mercado de biocompósito é estimada em 16,4%, com excelentes expectativas sobretudo para o setor automotivo, de construção civil, de bens de consumo e de eletrônicos. É esperado que esse crescimento aconteça de forma mais acentuada na região da Ásia-Pacífico devido ao aumento da infraestrutura, população e da renda *per capita* (MARKET ANALYSIS REPORT, 2018).

Comercialmente já existem empresas que oferecem produtos constituídos de biocompósitos a base de fibras de celulose. A UPM é uma empresa finlandesa com plantas na Finlândia e na Alemanha que fabricam dois tipos de biocompósitos, sendo um feito a partir de polímeros e papel reciclado (para uso final em ambientes abertos, *decks* e estruturas, por exemplo), e outro a partir de polímeros e polpa celulósica (utilizado para diversos fins, desde mobília até eletrônicos). Outro exemplo é a empresa sueca OrganoClick, que utiliza as fibras de celulose em uma tecnologia própria para moldagem, sendo possível produzir uma ampla gama de produtos. A Storaenso é uma empresa finlandesa que detém a tecnologia de produção de biocompósitos com fibras de celulose, utilizando polímeros virgens, reciclados, ou biodegradáveis, que podem ser utilizados para uma série de aplicações. No Brasil, a Suzano tem como estratégia aumentar o escopo dos seus negócios, desenvolvendo novos produtos baseados em madeira, como os biococompósitos.

Com novas empresas ampliando a capacidade de produção, o consumo desses produtos em todo o mundo tende a aumentar à medida que as tecnologias vão abrindo

espaço para novas aplicações. E por esse motivo é importante que a inserção desse tipo de produto no contexto de economia circular esteja bem entendida, de modo a evitar que a utilização das fibras como componentes em um dado material seja vista como uma desvantagem competitiva frente aos monomateriais poliméricos.

#### **4.5 Coleta**

Os impactos que as atividades humanas têm causado no planeta estão incentivando governos em todo o mundo a imporem políticas para pressionar as empresas e os consumidores a adotarem práticas mais sustentáveis. A coleta de materiais para a economia circular está bastante atrelada à maneira como um país lida com os seus resíduos. Na Europa, por exemplo, existem iniciativas para beneficiar economicamente os consumidores que devolverem produtos no local adequado. Uma taxa é cobrada sobre o valor de produtos específicos quando ele é comprado, e esse valor é devolvido para o consumidor quando o produto é devolvido aos pontos de coleta (EUROPEAN PARLIAMENT, 2011). No Brasil, a Política Brasileira de Resíduos Sólidos (PNRS) foi promulgada no ano de 2010, em que foi estabelecido o princípio da responsabilidade compartilhada na gestão de resíduos entre os diferentes atores da cadeia de abastecimento (importadores, comerciantes, fabricantes, consumidores etc.). Juntamente com o princípio da responsabilidade compartilhada, estabeleceu-se a necessidade de aplicação de logística reversa em uma série de produtos.

Para discutir a complexidade do tema da logística reversa, Guarnieria et al. (2020) levantam alguns pontos sobre a implementação do acordo para logística reversa no setor de embalagens do Brasil, que se trata de um setor bastante promissor para os biocompósitos de celulose. Os acordos setoriais são instrumentos-chave para estabelecer a responsabilidade individual de cada ator no desenvolvimento da logística reversa. Contudo, grande parte das empresas ainda enxerga essa questão apenas como cumprimento da legislação. Os autores apontam que a reinserção de resíduos na economia depende fortemente do bom funcionamento da logística reversa, que deve operacionalizar de forma correta a devolução, o transporte, o manuseio, o armazenamento, e a classificação. Para a boa funcionalização da logística reversa incialmente é preciso que os consumidores descartem os resíduos nos pontos de coleta, que serão posteriormente coletados por coletores ou empresas especializadas. Os coletores também têm um papel importante na etapa seguinte, que é de separação dos resíduos, de acordo com a demanda da empresa de reciclagem (Figura 7).

Figura 7 - Fluxo da logística reversa no brasil



Fonte: Adaptado de Coallision Of Companies For Reverse Logistics Of Packaging (2017)

Particularmente, no Brasil, a coleta dos resíduos urbanos está bastante atrelada ao trabalho de coletores informais, que prestam um trabalho fundamental para a logística reversa no país. De acordo com Fundação Ellen Macarthur (2017, p. 23-24)

O setor informal historicamente desenvolveu um número de iniciativas que aplicam princípios de circularidade, através de mercados de reparo, reforma, venda de produtos secundários e cadeias de reciclagem, sempre incorporados de um forte fator social que movimenta essas atividades. Enquanto a informalidade é responsável pela recuperação de um grande volume de equipamentos, partes e componentes, o setor sofre com vazamento significativo de materiais já que essas atividades aplicam processos que fogem aos padrões de qualidade da indústria para se manterem em novos ciclos de uso. Um fator crítico é o design de produtos.

Tal comentário reforça a importância do design de produto, conforme discutido previamente.

#### 4.6 Reciclagem

Um dos principais argumentos da utilização dos biocompósitos é o impacto ambiental que materiais parcialmente baseados em matéria-prima renovável podem causar quando são utilizados em substituição a materiais integralmente derivado de fontes fósseis. Entretanto, no contexto da economia circular, quando o produto atinge a etapa de reciclagem, sua continuidade no ciclo depende do grau de desenvolvimento das tecnologias disponíveis para esse fim. Caso essas tecnologias não estejam disponíveis, o material pode acabar não continuando no ciclo e, dessa forma, também apresentar um impacto ambiental negativo ao ser descartado incorretamente na natureza. Assim como foi discutido anteriormente para a etapa de manufatura, as técnicas e definições utilizadas para reciclagem dos polímeros e compósitos de fonte fóssil também são similares para os biocompósitos. Portanto, discussões acerca da reciclagem dos biocompósitos passam pelos casos análogos relativos aos materiais poliméricos convencionais.

A Sociedade Americana de Testes e Materiais (ASTM International) divide a reciclagem de polímeros em quatro classes: reciclagem primária, reciclagem secundária, reciclagem terciária, e reciclagem quaternária (ASTM D7209, 2006). A reciclagem primária é o reprocessamento de polímeros não contaminados, que podem ser utilizados para produzir novos produtos cujas propriedades se mantenham iguais às dos materiais virgens. Esse tipo de reciclagem também é conhecido como “fechamento do ciclo”, e geralmente está atrelado à utilização de resíduos pré-consumo. A reciclagem secundária acontece quando são utilizadas matérias-primas que possuem um elevado grau de contaminação devido à presença de outros materiais, e como consequência disso gera-se novos materiais com propriedades inferiores. Geralmente esse tipo de reciclagem carece de um processo de purificação seguido de uma reformulação, para que se possa produzir um novo produto com as especificações necessárias. A reciclagem terciária, ou também conhecida como reciclagem da matéria-prima, converte as cadeias poliméricas em outros insumos químicos de interesse. O resultado dessa conversão são moléculas que podem ser utilizadas como matérias primas para produção de novos polímeros, combustíveis ou novos insumos químicos. A reciclagem quaternária recupera os produtos em um nível energético por meio de incineração. O poder calorífico proveniente da incineração de polímeros sintéticos é geralmente maior do que aquele gerado pela queima do carvão, mas produz substâncias voláteis prejudiciais ao meio ambiente (BEKE et al., 2014; MERRINGTON, 2017). Os dois primeiros tipos de reciclagem (primária e secundária)

são processos físicos, e por isso são também conhecidos como reciclagem mecânica. As reciclagens terciária e quaternária são baseadas em processos químicos e térmicos, respectivamente, e por esse motivo são referenciadas também como reciclagem química e reciclagem térmica (EUROPEAN COMMISSION DG ENVIRONMENT, 2011).

A reciclagem de compósitos é uma questão complexa, que depende de tecnologias que ainda estão sendo desenvolvidas. As técnicas que estão sendo estudadas para esse fim envolvem reciclagem mecânica (trituração), térmica (pirólises, combustão, incineração etc), e química (solvólises) (YANG et al., 2012). A reciclagem mecânica consiste na trituração do material até que sejam obtidas pequenas frações de polímeros e fibras, que podem ser separadas por peneiras. Algumas empresas já fazem esse processo comercialmente para compósitos reforçados com fibras de vidro, como é o caso da Mixt Composites Recyclables (uma empresa francesa da Plastic Ominum), a Filon Products Ltd. no Reino Unido, e a norueguesa Tomra, com atuações no Brasil. No Brasil tem-se também o exemplo da Boomera, uma startup especializada em economia circular que tem uma fábrica localizada no Paraná. A reciclagem térmica em geral está relacionada à recuperação energética dos materiais, e se baseia nos processos de incineração, combustão, co-processamento e pirólise. A reciclagem química (solvólise) utiliza reagentes químicos para dissolver e despolimerizar as resinas sob diferentes condições de reações, e dessa forma separá-las das fibras (OLIVEUX; DANDY; LEEKE, 2014).

O desafio tecnológico que esse tipo de processo demanda acaba desencadeando outros problemas. Primeiramente, os custos relacionados à reciclagem dos compósitos e biocompósitos podem não se sustentar se for gerado um material mais caro que a matéria-prima virgem e com propriedades inferiores. Além disso, as propriedades do material, bem como o seu valor, tendem a cair conforme ele é submetido à consecutivos processos de reciclagem. Por fim, à medida que o material perde propriedades, seu leque de aplicações se restringe. Apesar desses problemas, uma série de incentivos tem fomentado a superação das dificuldades relacionadas à reciclagem de compósitos. Um desses incentivos vem por parte da legislação da União Europeia, que por meio de diretrizes, impostos e proibições, abre caminhos para os países adotarem práticas menos prejudiciais para o meio ambiente no que diz respeito a tratativa dos seus resíduos. Um exemplo disso é a Diretriz 94/62/CE, referente a embalagens e resíduos de embalagens (EUROPEAN PARLIAMENT AND COUNCIL DIRECTIVE, 1994). Paralelamente, pode-se citar que o Pacote de Economia Circular da União Europeia, lançado em 2015, estabelece alguns

objetivos para 2030 que são importantes no estímulo da reciclagem, que são: reciclar 75% do lixo municipal; reciclar 75% do lixo proveniente de embalagens; e reduzir para no máximo 10% a quantidade de lixo municipal que vai para aterro. Além disso, outro ponto de incentivo importante que se pode destacar na Europa vem por parte das oportunidades econômicas, que acontecem desde o financiamento a projetos que visam desenvolver, por exemplo, a ideia de circularidade para compósitos, até o investimento direto por parte dos governos e instituições em projetos que também estão envolvidos com essa temática. Entretanto, mesmo na Europa, ainda não há uma legislação que cobre por parte dos produtores práticas de reciclagem (VAN OUDHEUSDEN, 2019).

## 5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Tendo em vista as particularidades levantadas em cada uma das etapas da economia circular para os biocompósitos, pode-se destacar que existem desafios a serem superados e oportunidades. Muitos desafios do modelo de economia circular para os biocompósitos se assemelham àqueles do ciclo dos polímeros sintéticos, e soluções para esses desafios poderiam beneficiar ambos. Quando se leva em consideração a etapa de design de produto, por exemplo, todas as estratégias de design circular que foram destacadas como importantes para o bom funcionamento de um ciclo são soluções que podem ser aplicáveis a uma vasta gama de produtos. Outro exemplo de desafio cuja solução beneficiaria mutualmente os polímeros sintéticos e os biocompósitos é relativo à etapa de coleta dos materiais. A estruturação da cadeia de logística reversa tem um papel fundamental no ciclo dos produtos baseados em polímeros sintéticos, sobretudo para a etapa de reciclagem. Uma vez que este elo esteja devidamente desenvolvido, os produtos baseados em biocompósitos poderão fazer parte dos materiais que são coletados como recicláveis, e a partir disso, ter um tratamento especializado de separação dentro das cooperativas.

Existe, contudo, desafios particulares que os biocompósitos deverão superar para se beneficiar do modelo circular. Esses desafios se concentram nas etapas de manufatura e reciclagem. A manufatura dos biocompósitos de celulose ainda é um processo que está em desenvolvimento do ponto de vista industrial, e a prova disso é o número pequeno de empresas de grande porte que produzem esse tipo de material em grande escala. A reciclagem, por sua vez, é um dos campos que mais concentra os trabalhos voltados aos biocompósitos, e diferentes abordagens de estudos são possíveis. Contudo, pode-se dizer que essa etapa é um gargalo para a economia circular dos biocompósitos, e o motivo disso é o grau de desenvolvimento das tecnologias disponíveis. Uma forma de superar esses desafios é o estímulo, por parte de governos, ONGs e sociedade, para a criação de novos produtos que sejam menos prejudiciais ao planeta, o que motiva a pesquisa e a inovação na direção do modelo circular.

Os polímeros sintéticos estão mais desenvolvidos quando se trata de economia circular. Desde a etapa de design de produto, que é naturalmente mais desenvolvida para uma categoria de produtos que está no mercado há mais tempo, passando pela etapa da logística reversa, que conta com triagens mais seletivas e que favorecem mais o material

nas etapas subsequentes, e pela etapa de reciclagem, que conta com um sistema desenvolvido com a participação de grandes empresas. Entretanto, os argumentos que favorecem a utilização dos biocompósitos (sejam eles financeiros, ambientais ou relativos a ganho de propriedades) incentivam empresas, governos e setores de pesquisa a caminharem cada vez mais no sentido de estruturar o modelo da economia circular para os biocompósitos. As oportunidades geradas pela criação de um modelo que seja altamente sustentável de ciclo de vida para produtos baseados em biocompósitos são extremamente numerosas, e devem conduzir o desenvolvimento de novos produtos nos próximos anos.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ASTM INTERNATIONAL. **Standard Guide for Waste Reduction, Resource Recovery, and Use of Recycled Polymeric Materials and Products.** ASTM. [S.l.]. 2015.
- BAKKER, C. A. et al. **Products That Last - product design for circular business models.** Delft: TU Delft Library, 2014.
- BAUDRILLARD, J. **A Sociedade do Consumo.** Lisboa: Edições 70, 1970.
- BHATTACHARYYA, ; SUBASINGHE, ; KIM, N.. Natural fibers: Their composites and flammability characterizations. In: **Multifunctionality of Polymer Composites: Challenges and New Solutions.** [S.l.]: [s.n.], 2015. p. 102-143.
- BOCKEN, N. M. P. et al. Product design and business model strategies for a circular economy. **Journal of Industrial and Production Engineering**, v. 33, n. 5, p. 308-320, 2016.
- BOLAND, et al. Life Cycle Impacts of Natural Fiber Composites for Automotive Applications: Effects of Renewable Energy Content and Lightweighting. **Journal of Industrial Ecology** , v. 20, n. 1, p. 179-189, Maio 2015.
- BOURMAUD, A.; BALEY, C. Investigations on the recycling of hemp and sisal fibre reinforced polypropylene composites. **Polymer Degradation and Stability**, v. 92, n. 6, p. 1034-1045, Junho 2007.
- BRITISH PLASTICS FEDERATION. Plastic Saves: Facts and Downloads. **Polymer Zone**, 2015. Disponivel em: <<https://www.bpf.co.uk/polymer-zone/plastic-saves/default.aspx>>. Acesso em: 10 Março 2020.
- BRITISH PLASTICS FEDERATION. **Understanding the debate about plastic.** British Plastics Federation. London, p. 20. 2019.
- BUTLER,. Do Customers Really Care About Your Environmental Impact? **Forbes New York Business Council**, Nova Iorque, Novembro 2018. Disponivel em: <<https://www.forbes.com/sites/forbesnycouncil/2018/11/21/do-customers-really-care-about-your-environmental-impact/#6cd80fd6240d>>. Acesso em: 16 Maio 2020.

CALLISTER, W. D. J. **Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução.** 5<sup>a</sup>. ed. [S.I.]: LTC, 2002. 360-381 p.

CERRI,. Prós e contras do plástico para o meio ambiente. **eCycle**, 2011. Disponível em: <<https://www.ecycle.com.br/686-plastico-no-meio-ambiente>>. Acesso em: 02 Março 2020.

CHOI, ; NG,. Environmental and Economic Dimensions of Sustainability and Price Effects on Consumer Responses. **Journal of Business Ethics**, v. 104, p. 269-282, Maio 2011.

**CIRCLE ECONOMY. THE CIRCULARITY GAP REPORT 2019.** Circle Economy Organisation. Davos, p. 53. 2019.

**CIRCLE ECONOMY. THE CIRCULARITY GAP REPORT 2020.** Circle Economy Organisation. [S.I.], p. 66. 2020.

CORREA, J. ; MONTALVO-NAVARRETE, J. ; HIDALGO-SALAZAR,. Carbon footprint considerations for biocomposite materials for. **Journal of Cleaner Production**, v. 208, p. 785-794, Novembro 2019.

CROCKER,. From ‘Spaceship Earth’ to the Circular Economy: The Problem of Consumption. **Unmaking Waste in Production and Consumption: Towards the Circular Economy**, p. 13-33, 2018.

D'ANGELO, P. Sustentabilidade: os consumidores estão preocupados com ações sustentáveis. **Opinion Box**, 2019. Disponível em: <<https://blog.opinionbox.com/pesquisa-de-mercado-sustentabilidade>>. Acesso em: 16 Maio 2020.

**ELLEN MACARTHUR FOUNDATION. Uma Economia Circular no Brasil: Uma abordagem exploratória Inicial.** Circular Economy 100 (CE100). [S.I.], p. 30.

EUROPEAN COMMISSION. European Commission - Environment. **Directive 2008/98/EC on waste (Waste Framework Directive)**, 2009. Disponível em: <<https://ec.europa.eu/environment/waste/framework/>>. Acesso em: 10 Outubro 2020.

EUROPEAN COMMISSION DG ENV. **PLASTIC WASTE IN THE ENVIRONMENT.** European Commission in association with AEA Energy & Environment. [S.I.], p. 171. 2011.

EUROPEAN PARLIAMENT. **European Parliament and Council Directive 94/62/EC of 20 December 1994 on packaging and packaging waste.** European Parliament. [S.l.]. 1994.

EUROPEAN PARLIAMENT. **A European Refunding Scheme for Drinks Containers.** European Parliament. [S.l.], p. 38. 2011.

EUROPE UNION. EUR-Lex, 1994. Disponivel em: <<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/ALL/?uri=CELEX:31994L0062>>. Acesso em: 01 fev. 2020. Document 31994L0062.

GEISSDOERFER, et al. The Circular Economy e A new sustainability paradigm? **Journal of Cleaner Production**, n. 143, p. 757-768, 2017.

GU, et al. From waste plastics to industrial raw materials: A life cycle assessment of mechanical plastic recycling practice based on a real-world case study. **Science of The Total Environment**, v. 601-602, p. 1192-1207, Dezembro 2017.

GUARNIERI, ; CERQUEIRA-STREIT, J. A.; BATISTA, L. C. Reverse logistics and the sectoral agreement of packaging industry in Brazil. **Resources, Conservation & Recycling**, v. 153, p. 1-12, 2020.

GURUNATHAN, ; JEONG, J.-K.; HAN, J. W. Multidimensional effects of biologically synthesized silver nanoparticles in Helicobacter pylori, Helicobacter felis, and human lung (L132) and lung carcinoma A549 cells. **Nanoscale Research Letters** , p. 10 -35, 2015.

HAFFMANS, S. **Products That Flow: Circular Business Models and Design Strategies for Fast Moving Consumer Goods.** [S.l.]: BIS Publishers, 2018.

HELBIG, et al. Benefits of resource strategy for sustainable materials researchand development. **Sustainable Materials and Technologies**, v. 12, p. 1-8, Maio 2018.

HOLLANDER, M. C. D.; BAKKER, ; HULTINK,. Product Design in a Circular Economy Development of a Typology of Key Concepts and Terms. **Journal of Industrial Ecology**, v. 21, n. 3, p. 517-525, Novembro 2017.

HOTTEL, T. ; BILEC, M. M.; LANDIS, A. E. Sustainability assessments of bio-based polymers. **Polymer Degradation and Stability**, v. 98, n. 9, p. 1898-1907, 2013.

HUBER, et al. A critical review of all-cellulose composites. **Journal of Materials Science**, v. 47, p. 1171-1186, Fevereiro 2012.

IGNATYEV, I. A.; THIELEMANS, ; BEKE, B. V. Recycling of Polymers: A Review. **ChemSusChem**, v. 7, n. 6, 2014.

INTERNATIONAL INSTITUTE FOR SUSTAINABLE DEVELOPMENT. The 4Rs - reduction, reuse, recycling and recovery. **IISD's Business and Sustainable Development: A Global Guide**, 2013. Disponível em: <[https://www.iisd.org/business/tools/bt\\_4r.aspx](https://www.iisd.org/business/tools/bt_4r.aspx)>. Acesso em: 20 Fevereiro 2020.

JARVIE, M. Brundtland Report. **Encyclopædia Britannica**, 2016. Disponível em: <<https://www.britannica.com/topic/Brundtland-Report>>. Acesso em: 01 Fevereiro 2020.

JOSHIA , et al. Are natural fiber composites environmentally superior to glass fiber reinforced composites? **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, v. 35, n. 3, p. 371-376, Março 2004.

KIRCHHERR , J.; REIKE, ; HEKKERT,. Conceptualizing the circular economy: An analysis of 114 definitions. **Resources, Conservation & Recycling**, n. 127, p. 221-232, 2017.

LEÃO, et al. The Recycling of Sugarcane Fiber/Polypropylene Composites. **Materials Research**, v. 18, n. 4, p. 690-697, 2015.

LEGNAIOLI,. Entenda o impacto ambiental do lixo plástico para a cadeia alimentar. **eCycle**, 2018. Disponível em: <<https://www.ecycle.com.br/6251-impacto-ambiental-do-lixo-plastico.html>>. Acesso em: 03 Março 2020.

LUZ, S. M. et al. Ecodesign Applied to Components Based on Sugarcane Fibers. **Materials Science Forum Vols 636-637**, p. 226-232, 2010.

LUZ, S. M. **Estudo das propriedades mecânicas, interface e morfologia de compósitos de polipropileno reforçados com fibras de bagaço e palha de cana**. Universidade de São Paulo. Lorena, p. 153. 2008.

MAINIERI, T. et al. Green Buying: The Influence of Environmental Concern on Consumer Behavior. **The Journal of Social Psychology**, v. 137, n. 2, p. 189-204, 1997.

MARKET ANALYSIS REPORT. **Biocomposites Market Size, Share & Trends Analysis Report By Fiber Type (Wood, Non-wood), By Polymer Type (Natural, Synthetic), By Product Type (Green, Hybrid), By End Use, And Segment Forecasts, 2018 - 2025**. [S.l.], p. 187. 2018. (GVR-2-68038-199-3).

MAYA , J. ; SABU ,. Biofibres and biocomposites. **Carbohydrate Polymers**, n. 71, p. 343-364, 2008.

MERRINGTON, A. Recycling of Plastics. In: **Applied Plastics Engineering Handbook**. [S.l.]: [s.n.], 2011. Cap. 9, p. 177-192.

MUNEER, F. Biocomposites from natural polymers and fibers. **Introductory paper at the Faculty of Landscape Architecture, Horticulture and Crop Production Science**, v. 3, p. 4-30, Agosto 2015.

NAGALAKSHMAIAH, M. et al. Biocomposites: present trends. In: **Green Composites for Automotive Applications**. [S.l.]: [s.n.], 2019. Cap. 9, p. 197-215.

OLIVEUX, G.; DANDY, L. O.; LEEKE, G. A. Current status of recycling of fibre reinforced polymers: Review of technologies, reuse and resulting properties. **Progress in Materials Science**, n. 72, p. 61–99, 2015.

QUADROS, T. O histórico dos principais encontros e acordos climáticos mundiais. **Nexo**, São Paulo, Novembro 2018. Disponível em: <<https://www.nexojornal.com.br/grafico/2017/11/17/O-hist%C3%B3rico-dos-principais-encontros-e-acordos-clim%C3%A1ticos-mundiais>>. Acesso em: 01 Fevereiro 2020.

RAMAMOORTHY, K.; SKRIFVARS, M.; PERSSON,. A Review of Natural Fibers Used in Biocomposites: Plant, Animal and Regenerated Cellulose Fibers. **Polymer Reviews**, v. 55, p. 107-162, Janeiro 2015. ISSN 1558-3716.

RAMIRES, E. C. **Biocompósitos a partir de matrizes baseadas em lignina, tanino e glixoxal reforçadas com fibras naturais**. Universidade de São Paulo. São Carlos, p. 262. 2010.

RHEIN, S.; SCHMID, M. Consumers' awareness of plastic packaging: More than just environmental concerns. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 162, Novembro 2020.

ROYER, S.-J. et al. Production of methane and ethylene from plastic in the environment. **Plos One**, v. 8, p. 1-13, Agosto 2018.

SAHEB, D. N.; JOG, J. P. Natural fiber polymer composites: A review. **Advances in Polymer Technology**, v. 18, p. 351–363, Outubro 1999.

SCHAUENBERG,. O que fazer com o lixo que a China parou de comprar? **DW Brasil**, 2019. Disponivel em: <<https://www.dw.com/pt-br/o-que-fazer-com-o-lixo-que-a-china-parou-de-comprar/a-48231807>>. Acesso em: 22 Março 2020.

SCIENCE HISTORY INSTITUTE. Science Matters: The Case of Plastics - History and Future of Plastics, 2013. Disponivel em: <<https://www.sciencehistory.org/the-history-and-future-of-plastics>>. Acesso em: 20 Fevereiro 2020.

SPADETTI, et al. ropriedades térmicas e mecânicas dos compósitos de Polipropileno pós-consumo reforçados com fibras de celulose. **Polímeros**, v. 29, p. 84-90, 2017.

STAHEL, W. **The Performance Economy**. 2<sup>a</sup>. ed. Londres: PALGRAVE MACMILLAN, 2010.

SWETHA, M. et al. Biocomposites containing natural polymers and hydroxyapatite for bone tissue engineering. **International Journal of Biological Macromolecules**, v. 47, n. 1, p. 1-4, Julho 2010.

SZCZEŚNIAK, ; RACHOCKI, ; TRITT-GOC,. Glass transition temperature and thermal decomposition of cellulose powder. **Cellulose**, v. 15, n. 3, p. 445-451, Junho 2008.

THE CLUB OF ROME. The Club of Rome Organization, 2020. Disponivel em: <<https://clubofrome.org/about-us/>>. Acesso em: 01 Fevereiro 2020.

UN ENVIRONMENT PROGRAME. Double trouble: plastics found to emit potent greenhouse gases, 2018. Disponivel em: <<https://www.unenvironment.org/news-and-stories/story/double-trouble-plastics-found-emit-potent-greenhouse-gases>>. Acesso em: 4 Março 2020.

UNITED NATIONS. What is the Kyoto Protocol? **UNFCCC Sites and Platforms**, Fevereiro 2013. Disponivel em: <[https://unfccc.int/kyoto\\_protocol](https://unfccc.int/kyoto_protocol)>. Acesso em: 01 Fevereiro 2020.

UNITED NATIONS. What is the Paris Agreement? **UNFCCC Sites and Platforms**, 2016. Disponivel em: <<https://unfccc.int/process-and-meetings/the-paris-agreement/what-is-the-paris-agreement>>. Acesso em: 01 Fevereiro 2020.

VIDAL, ; GARRAÍN, ; MARTÍNEZ,. Life cycle assessment of composite materials made of recycled thermoplastics combined with rice husks and cotton linters. **The International Journal of Life Cycle Assessment** , v. 14, n. 1, p. 73-82, 2009.

VOM SAAL, et al. Plastics, the environment and human health: current consensus and future trends. **Philosophical Transactions of The Royal Society**, n. 364, p. 2153-2166, 2009.

WAKE, H. Oil refineries: a review of their ecological impacts on the aquatic environment. **Estuarine, Coastal and Shelf Science**, v. 62, p. 131-140, Janeiro 2005.

WALL-MARKOWSKI, ; KICHERER, ; SALING, P. Using eco-efficiency analysis to assess renewable-resource-based technologies. **Environmental Progress**, v. 23, n. 4, p. 329-333, Dezembro 2004.

WELLE,. União Europeia aprova legislação para banir produtos plásticos descartáveis. **G1**, 2019. Disponível em: <<https://g1.globo.com/natureza/noticia/2019/03/27/uniao-europeia-aprova-legislacao-para-banir-produtos-plasticos-descartaveis.ghtml>>. Acesso em: 20 Março 2020.

WIEDENHOFER, D. et al. Integrating Material Stock Dynamics Into Economy-Wide Material Flow Accounting: Concepts, Modelling, and Global Application for 1900–2050. **Ecological Economics**, v. 156, p. 121-133, 2019.

WYTZE, V. D. G.; SIKKEMA, R.; VOHRER, M. The contribution of forest carbon credit projects to addressing the climate change challenge. **Climate Policy**, v. 18, n. 1, p. 42-48, Março 2016.

YANG, et al. Recycling of composite materials. **Chemical Engineering and Processing: Process Intensification**, v. 51, p. 53-68, 2012.

YARAHMADI, N.; JAKUBOWICZ, ; ENEBRO,. Polylactic acid and its blends with petroleum-based resins: Effects of reprocessing and recycling on properties. **Journal of Applied Polymer Science**, p. 1-9, Maio 2016.

YIN, R. K. **Estudo De Caso - Planejamento e Métodos**. 2<sup>a</sup>. ed. Porto Alegre: Bookman, 2001.

ZEIDAN, R. Urbanização dá fôlego para China crescer por 30 anos. **Folha de S. Paulo**, 2019. Disponível em: <<https://www1.folha.uol.com.br/mercado/2019/01/urbanizacao-da-folego-para-china-crescer-por-30-anos.shtml>>. Acesso em: 01 Março 2020.

ZINK, ; GEYER,. Circular Economy Rebound. **Journal of Industrial Ecology**, v. 21, n. 3, p. 593-602, Fevereiro 2017.