

Artigo

Ciclo de Vida de Compósitos com Fibras Vegetais: Uma Análise Qualitativa das Emissões de Gases Efeito Estufa (GEE) do Compósito de Polipropileno com Fibra de Sisal

Medeiros D. L.;* Tavares, A. O. C.; Rozados, I. L. G.; dos Santos, E. S.; Viana, J. D.

Rev. Virtual Quim., 2016, 8 (4), 1166-1180. Data de publicação na Web: 11 de agosto de 2016

<http://rvq.sbq.org.br>

Life Cycle of Plant Fiber Composites: A Qualitative Analysis of Greenhouse Gases (GHG) Emissions of Polypropylene Composite with Sisal Fiber

Abstract: The climate change has raised the need for a new production standard for the reduction of Greenhouse Gas (GHG). In this context, the aim of this paper was to map the lifecycle of the production of a helmet made of Plant Fiber Composite (PFC), polypropylene from fossil and sisal fiber, with emphasis on the environmental impact of GHG. The methodology consisted of consultations in the literature, pilot plant research at the Laboratory of Polymer SENAI CIMATEC (Salvador - BA) and comparison of the helmet life cycle thinking considering two distinct compositions: pure polypropylene (PP) and PFC, 80 % polypropylene and 20 % sisal, considering their GHG emissions based on *GHG Protocol* method. It was observed that the insertion of plant fiber in the polymer matrix showed economic benefits as it is four times cheaper than the polypropylene material. GHG emissions under Scope I and II were the same for both helmets because of processes similarities. Regarding Scopes III, only the qualitative analysis showed that the two products have different supply chains as they demand different inputs. It was concluded that, independent of the entire quantification of GHG emissions, it is remarkable that the difference in GHG emissions in the production of PP helmet in relation to the PFC helmet is due to pre-manufacturing and pos-usage stages, as there is no significant difference in the environmental impact of helmets in the Manufacturing and Usage stages.

Keywords: Plant Fiber Composite; Sisal; Polypropylene; Greenhouse Gas; Life Cycle Analysis (LCA).

Resumo

As mudanças climáticas tem despertado a necessidade de um novo padrão de produção para a redução das emissões dos Gases Efeito Estufa (GEE). Nesse contexto, o objetivo desse artigo foi mapear o ciclo de vida da produção de um capacete de obra feito a partir do Compósito de Fibra Vegetal (CFV), que é um composto de polipropileno de origem fóssil e fibra de sisal, com ênfase no impacto ambiental das emissões de GEE. A metodologia do trabalho consistiu em consultas na literatura, investigação da planta piloto do Laboratório de Polímeros do SENAI CIMATEC (Salvador – BA) e comparação do Pensamento do Ciclo de Vida do capacete de obra considerando o polipropileno (PP) puro de origem fóssil e o CFV, 80% polipropileno e 20% sisal, sendo considerada as fontes de emissão de GEE com base no método *GHG Protocol*. Foi observado que a inserção da fibra vegetal na matriz polimérica demonstrou benefícios econômicos, devido, principalmente, ao preço da fibra vegetal ser quatro vezes inferior ao preço do polipropileno. Constatou-se que as emissões de GEE no Escopo I e II são iguais para ambos os capacetes devido a similaridades no processo de Manufatura. Em compensação, apenas a análise qualitativa do Escopo III apresentou diferenças entre as cadeias produtivas do capacete de PP puro e CFV por conta dos insumos que cada um utiliza. Concluiu-se que, independente da quantificação das emissões de GEE de forma quantitativa em cada Escopo, é notável que a diferença nas emissões de GEE da produção do capacete de PP puro em relação ao capacete de CFV é devido as etapas de Pré-manufatura e Pós-uso, visto que não há diferença significativa no impacto ambiental dos capacetes na etapa de Manufatura e Uso.

Palavras-chave: Compósitos de Fibras Vegetais; Sisal; Polipropileno; Gases do Efeito Estufa; Análise do Ciclo de Vida (ACV).

* Pró-Sustentabilidade Consultoria, Rua Eliana Dantas, 182, Queimadinha, CEP 44050-216, Feira de Santana-BA, Brasil. Endereço eletrônico: <https://sites.google.com/site/prosustentabilidadeeco/>

 diegomedeiros350@gmail.com

DOI: [10.21577/1984-6835.20160083](https://doi.org/10.21577/1984-6835.20160083)

Ciclo de Vida de Compósitos com Fibras Vegetais: Uma Análise Qualitativa das Emissões de Gases Efeito Estufa (GEE) do Compósito de Polipropileno com Fibra de Sisal

Diego L. Medeiros,^{a,*} Arilma Tavares,^b Ian Rozados,^b Everton Santos,^c Josiane D. Viana^c

^a Pró-Sustentabilidade Consultoria, Rua Eliana Dantas, 182, Queimadinha, CEP 44050-216, Feira de Santana-BA, Brasil.

^b Escola Politécnica da Universidade Federal da Bahia, Programa de Pós-graduação em Engenharia Industrial (PEI), Rua Aristides Novis, CEP 40210-630, Salvador-BA, Brasil.

^c SENAI CIMATEC, Área de Materiais, Campus Integrado de Manufatura e Tecnologia, CEP 41650-010, Salvador-BA, Brasil.

* diegomedeiros350@gmail.com

Recebido em 6 de agosto de 2016. Aceito para publicação em 6 de agosto de 2016

1. Introdução

2. Revisão da Literatura

- 2.1.** Gases Efeito Estufa
- 2.2.** Pegada de Carbono
- 2.3.** Química Verde
- 2.4.** Polipropileno (PP)
- 2.5.** Fibra de Sisal
- 2.6.** Características e aplicações dos compósitos
- 2.7.** ACV aplicado aos compósitos

3. Metodologia

4. Resultados e Discussão

5. Conclusão

1. Introdução

As atividades humanas, em especial o uso de combustíveis fósseis e a mudança no uso da terra, trouxeram bem-estar ao homem em detrimento do equilíbrio ecológico,

principalmente, relacionado às mudanças climáticas.¹ Por hora, a pesquisa científica brasileira avança no entendimento da biodiversidade nacional para se precaver de crises drásticas, melhorar o bem-estar da população e garantir a sustentabilidade ambiental.²

Foi constatado nos relatórios do Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (IPCC) com uma margem de confiança acima de 95%, que a principal causa das mudanças climáticas é resultado das emissões antrópicas de gases efeito estufa (GEE), especialmente o CO₂ fóssil, o qual representa 65% desse impacto.³

Ressalta-se que experimentos laboratoriais comprovam que o CO₂ é um gás estufa.⁴ As mudanças climáticas podem aumentar a severidade de outros impactos ambientais existentes como a escassez de água e o aumento da concentração de poluentes persistentes em ambientes aquáticos, as quais regiões polares e áridas estão entre as mais afetadas.¹

Os oceanos são os maiores sequestradores de carbono, portanto é importante entender os seus mecanismos em escalas local, regional e global. Os ecossistemas marinhos costeiros são os locais oceânicos de maior captura de carbono, apesar de constituírem apenas 5% de sua área total.⁵

O uso do dióxido de carbono como matéria prima na manufatura de materiais duráveis, a exemplo dos plásticos verdes e dos compósitos de fibras vegetais que usam matérias primas renováveis como insumo, pode contribuir no sequestro de carbono e ajudar na sua estabilização. É importante destacar que os principais meios de capturar e reduzir as emissões de carbono são: (1) o sequestro físico a partir do armazenamento geológico; (2) o sequestro biológico a partir

da absorção bioquímica (a exemplo dos compósitos de fibras vegetais); (3) a substituição de insumos de origem não renovável pelos renováveis; (4) o aumento da eficiência de processos intensivos em energia; (5) a maior eficiência no transporte; e (6) a reciclagem de materiais e nutrientes. Dessa forma, muitos esforços têm sido empregados para reduzir as emissões dos GEE, o que tem contribuído para o elevado crescimento na produção científica e tecnológica sobre o tema.^{3,6}

Nesse contexto, o presente artigo objetivou comparar de forma qualitativa qual ciclo de vida é menos impactante sob o aspecto da emissão de GEE, considerando como objeto de análise o capacete de obra produzido a partir de duas matérias primas distintas: a) polipropileno puro (PP) e b) Compósito de Fibra Vegetal (CFV), composto de polipropileno de origem fóssil e fibra de sisal.

2. Revisão da Literatura

2.1. Gases Efeito Estufa

O Brasil vem consolidando esforços para reduzir sensivelmente as emissões de GEE e o setor florestal tem sido o principal foco de atuação devido o seu grande potencial de contribuição nesse aspecto ambiental (Figura 1).

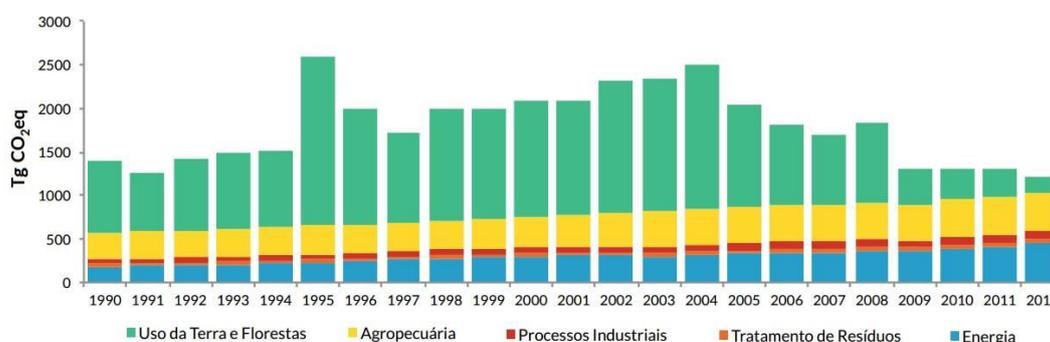


Figura 1. Emissões anuais brasileiras de gases efeito estufa no período de 1990-2012 em Tera gramas (ou milhões de toneladas) de CO₂ equivalente. Fonte: MCT, 2014.⁷

As reduções referentes ao Uso da Terra e Florestas são atribuídas ao controle de queimadas e desmatamentos ilegais. Na Agropecuária, o aumento no uso de fertilizantes e do rebanho bovino contribuiu para o aumento das emissões. Nos Processos Industriais o aumento não foi representativo pelo aumento na eficiência dos processos produtivos. No Tratamento de Resíduos a contribuição também foi pouco representativa comparado aos demais setores. No entanto, o uso da Energia para transporte e habitação causou um aumento considerável nas emissões de GEE. O Brasil possui uma matriz elétrica com baixa emissão de CO₂, em relação a outros países, devido a sua matriz ser composta de energia hidroelétrica em, aproximadamente, 77%.⁸ O entendimento da composição da matriz elétrica brasileira é um fator chave para verificar o quanto os produtos brasileiros intensivos em energia elétrica podem se beneficiar no mercado mundial.

2.2. Pegada de Carbono

No contexto das mudanças climáticas, surge a Pegada de Carbono como indicador da quantidade de emissões de GEE associadas ao ciclo de vida de produtos ou serviços.

A definição mais atual de pegada de carbono de produtos de acordo com o guia britânico para cálculo de emissão de gases efeito estufa de produtos e serviços BSI-PAS2050⁹ é “o valor total de gás carbônico e outros gases estufa emitidos durante todo o ciclo de vida de um produto ou serviço”, expressa em CO₂ equivalente.

O Potencial de Aquecimento Global (PAG) do dióxido de carbono é utilizado como indicador da categoria de impacto dos GEE. Sendo assim, todos os GEE são convertidos para equivalentes de dióxido de carbono (CO₂eq) através dos fatores de conversão dados pelo IPCC (Tabela 1).

Tabela 1. Potencial de Aquecimento Global dos principais Gases Efeito Estufa

Nome comum	Formula química	PAG para um horizonte de 100 anos
Dióxido de Carbono	CO ₂	1
Metano	CH ₄	25
Oxido Nitroso	N ₂ O	298

Fonte: Painel Intergovernamental de Mudanças climáticas (IPCC).¹⁰

Os inventários de GEE são elaborados no cálculo da Pegada de Carbono de um estabelecimento, produto ou serviço com a finalidade de rastrear todas as emissões relacionadas a uma unidade de referência (por exemplo, uma tonelada de produto, uma quantidade de energia ou a prestação de um serviço) resultando num indicador final de emissões de dióxido de carbono equivalente (CO₂e). Normalmente são usados os resultados da Pegada de Carbono de insumos básicos (ex. plásticos, concreto, água e energia elétrica) para elaborar inventários de produtos que fazem uso desses insumos. No

caso de estudos comparativos de produtos com funções diferentes, convencionou-se uma base comparativa ou unidade funcional para permitir uma análise justa.

Um inventário de emissões pode ter diferentes abrangências de escopos. Eles são divididos em três tipos¹¹:

- Escopo I - contabiliza apenas as emissões diretas da unidade produtiva;
- Escopo II – contempla as emissões do Escopo I e contabiliza as emissões

relacionadas à aquisição de energia que ocorrem fora dos limites da unidade produtiva, a exemplo da aquisição de energia elétrica ou térmica;

- Escopo III – contempla as emissões dos Escopos I e II e contabiliza todas as outras emissões indiretas geradas por terceiros e que de alguma maneira se relaciona com o produto ou serviço em análise.

A norma ABNT ISO 14040¹² e 14044¹³ de Avaliação do Ciclo de Vida orienta a condução de avaliações que usam a abordagem de Escopo III. Um exemplo do uso da metodologia de ciclo de vida em estudo de emissões de GEE foi o guia desenvolvido pela Inglaterra, denominado PAS 2050, que oferece um método prático para empresas de diversos setores conduzirem estudos de Avaliação do Ciclo de Vida das emissões de GEE de seus produtos e serviços.⁹

O *World Business Council for Sustainable Development* (WBCSD) em conjunto com o *World Resources Institute* (WRI), instituições que desenvolveram a metodologia do *GHG Protocol*, publicaram recentemente duas normas para inventário de GEE, uma de produto e outra corporativa, denominadas

Product Life Cycle Accounting and Reporting Standard e *A Corporate Accounting and Reporting Standard: Guidelines for Value Chain (Scope III) Accounting and Reporting*, com a finalidade de atender a necessidade de quantificação do Escopo III. A *International Organization for Standardization* (ISO) lançou em 2013 a norma internacional ISO 14067 para Pegada de Carbono de Produtos. Dessa forma, nota-se o quanto esse indicador, Pegada de Carbono, tem sido estudado e aplicado.

2.3. Química Verde

A Química Verde (QV) visa à promoção da sustentabilidade e da qualidade de vida. Segundo a Agência Ambiental Americana¹⁴ e outros¹⁵ a QV visa o projeto de processos e produtos químicos que reduzam ou eliminem o uso ou geração de substâncias perigosas. A QV se aplica em todo o ciclo de vida de um produto químico, incluindo a sua concepção, fabricação, utilização e disposição final, considerando 12 princípios norteadores (Quadro 1).

Quadro 1. Doze princípios da Química Verde

1 . Evitar o desperdício.	7 . Uso de matérias-primas renováveis.
2 . Maximizar economia atômica.	8 . Evitar a formação de derivados químicos.
3 . Projeto de sínteses químicas menos perigosas.	9 . Uso catalisadores no lugar de reagentes estequiométricos.
4 . Projetar produtos químicos mais seguros.	10 . Produtos químicos e materiais que degradam após o uso.
5 . Uso de solventes mais seguros.	11 . Monitorar as emissões em tempo real para evitar a poluição.
6 . Aumentar a eficiência energética.	12 . Minimizar o potencial de acidentes.

Fonte: U.S. EPA.¹⁴

Verificou-se que o uso do CFV na produção do capacete de obra, produto objeto desse artigo, se adequou, direta ou indiretamente, a 6 dos 12 princípios da QV,

são eles: 3, 4, 6, 7, 10 e 12:

- Item 3: a substituição de parte do polipropileno pela fibra vegetal de sisal reduz o potencial de toxicidade da cadeia de

produção;

- Item 4: a parte biodegradável do sisal pode tornar o descarte do capacete menos impactante;
- Itens 6 e 7: a fibra de sisal usa menos energia na sua fabricação do que o plástico, pois ela é secada ao ar livre, além de ser uma matéria prima renovável;
- Item 10: o uso das fibras torna parte do produto biodegradável;
- Item 12: a redução no uso de matéria prima fóssil minimiza o potencial de acidentes, pois a indústria do petróleo possui maior risco de acidentes do que a produção do sisal.

2.4. Polipropileno (PP)

O PP é um polímero ou termoplástico derivado do propeno ou propileno. O polipropileno é reciclável e sua fórmula molecular é $\text{CH}_2=\text{CH}-\text{CH}_3$. Entre os processos de transformação de plástico, a grande maioria dos polipropilenos é conformada através da moldagem por injeção, moldagem por extrusão e sopro, empregadas na produção de recipientes para alimentos, brinquedos, filmes, fibras para produção de TNT (Tecido Não-Tecido), materiais de aplicações hospitalar entre outros.^{16,17}

O PP é uma resina polimérica que possui baixa densidade e que oferece um bom equilíbrio de propriedades térmicas, químicas e elétricas, acompanhadas da ductilidade e da resistência que pode ser aumentadas ou até mesmo melhorada através da adição de cargas (ex. fibras). Algumas características do PP são: baixo custo; fácil moldagem; fácil coloração; alta resistência à fratura por flexão ou fadiga; boa resistência ao impacto acima de 15 °C; boa estabilidade térmica; sensibilidade à luz UV e agentes de oxidação, sofrendo degradação com maior facilidade; quimicamente inerte.¹⁸

Segundo as cotações da Rede do Plástico¹⁹ o PP virgem custa R\$ 5,00/kg, enquanto o PP reciclado custa R\$ 3,50/kg, ambos sem considerar os encargos tributários.

2.5. Fibra de Sisal

O sisal é uma planta cultivada em regiões áridas, trazendo uma economia para as populações que vivem no semiárido baiano.²⁰ Segundo a Companhia Nacional de Abastecimento²⁰ a produção brasileira de sisal em 2011 foi de 111 mil toneladas, divididos entre: Bahia, 95,8%; Paraíba, 3,5%; Ceará 0,4%; e Rio Grande do Norte, 0,3%. Segundo o mesmo órgão, o preço mínimo do sisal sofreu um reajuste de 20%, em Junho de 2012, com o valor pago ao produtor de R\$ 1,10/ kg, sujeito a oscilação de mercado. Esse valor encontra-se abaixo do mínimo estabelecido pelo governo, de R\$ 1,24/ kg. No ano de 2012, mais da metade da produção brasileira da fibra de sisal foi exportada, sendo que os principais consumidores são China seguida de Portugal.

2.6. Características e aplicações dos compósitos

Os compósitos, de maneira geral, são materiais que possuem pelo menos dois componentes ou duas fases, com propriedades físicas e químicas nitidamente distintas, em sua composição. Cada material de um compósito atua de maneira específica em função de suas próprias características, sendo que a matriz determina propriedades importantes como comportamento térmico e elétrico, aparência superficial e resistência a agentes químicos.²¹ Os componentes não matriciais de um compósito são chamados de cargas (*fillers*) e podem ser definidas como materiais não sólidos, não solúveis que são adicionados aos polímeros em quantidades suficientes para diminuir os custos ou alterar suas propriedades físicas.

O Quadro 2 demonstra os diferentes tipos de matrizes poliméricas e as diferentes cargas aplicadas na produção de compósitos. As matrizes podem ser termoplásticas ou termofixas, sendo que o CFV em estudo é de matriz termoplástica. As cargas possuem três

classificações, podendo ser fibrosa ou não fibrosa, orgânica ou inorgânica, natural ou sintética. O estudo de caso do CFV de sisal se classifica em carga fibrosa, orgânica e natural.

Quadro 2. Componentes de um compósito polimérico^{21,22}

Compósito Polimérico		Exemplos
Fase contínua (matriz)	Termoplástico	Poliéter éter cetona
		Poliamida imida
		Poliétersulfona
		Poli-sulfeto de fenileno
	Termofixo	Resinas fenólicas
		Resina Polimidas
		Resina epóxi
		Resina poliéster
Fase dispersa (cargas)	Fibrosa	Fibra de sisal, licuri, bambu
	Não fibrosa	Talco / Carbonato de cálcio
	Orgânica	Todas as fibras naturais
	Inorgânica	Fibra de vidro
	Natural	Fibra de sisal, licuri, bambu
	Sintética	Fibra de kevlar® / PP

O uso de cargas inertes altera as propriedades dos polímeros, fornecendo: maior estabilidade dimensional, menor retração de moldagem, menor dependência das propriedades com a temperatura, maior rigidez, maior dureza, maior densidade, maior temperatura de deflexão térmica (HDT, em inglês), acabamento superficial inferior, menor resistência a tração, menor fluência e menor custo.²¹ A carga inerte pode se comportar de diferentes maneiras a depender do seu percentual introduzido na composição do compósito. Elas podem se apresentar de três formas: carga de enchimento, visando a diminuição de custos; carga funcional, a exemplo da coloração ou redução da sensibilidade a radiação solar; e carga de reforço, a fim de melhorar as propriedades mecânicas dos compósitos. Nesse sentido, podem-se identificar diversas vantagens e desvantagens da adição de cargas de fibras vegetais na produção de

compósitos (Quadro 3).

O Laboratório de Polímeros do SENAI CIMATEC em Salvador, no estado da Bahia, desenvolve compósitos com matrizes poliméricas e fibras naturais para aplicações variadas, a exemplo da indústria naval, da construção civil e de móveis (Figura 2).

Dentre os estudos desenvolvidos, destacam-se:

- Desenvolvimento de compósitos de polímero, madeira e resíduos para usos diversos;
- Desenvolvimento de compósito de madeira plástica a partir de madeira ou casca de arroz para aplicação marítima;
- Desenvolvimento de compósitos de polipropileno com sisal.

Quadro 3. As principais vantagens e desvantagens do uso das fibras vegetais²²

Vantagens	Desvantagens
Baixa massa específica.	Baixa temperatura de processamento, isto é, não toleram mais do que 200 °C durante a consolidação no interior da matriz de um compósito.
Maciez e abrasividade reduzida.	Acentuada variabilidade nas propriedades mecânicas e baixa estabilidade dimensional.
Recicláveis, não tóxicas e biodegradáveis.	Alta sensibilidade a efeitos ambientais, tais como variações de temperatura da umidade.
Baixo custo.	As de ordem vegetal sofrem significativas influências referentes ao solo, à época da colheita, ao processamento após a colheita e à localização no corpo da planta.
Estimulam emprego na zona rural.	Apresentam seções transversais de geometria complexa e não uniforme.
Baixo consumo de energia na produção.	Propriedades mecânicas modestas em relação aos materiais estruturais tradicionais.

**Figura 2.** Produtos diversos, tais como recosto de cadeira, capacete, embalagens, pisos, tambores, cadeiras, produzidos a partir de diferentes receitas de Compósitos Poliméricos de Fibras Vegetais

2.7. ACV aplicado aos compósitos

Pesquisas recentes estão interessadas em verificar o ganho ambiental do uso de materiais de CFV. Foi constatado que o desempenho ambiental do CFV de polipropileno reforçado com bagaço de cana teve um desempenho ambiental superior ao do polipropileno reforçado com talco.²³ Por outro lado, uma pesquisa comparou o uso de madeira tratada e compósitos de madeira plástica, mistura de termoplásticos e pó de serra, usados em decks de piscina.²⁴ Os autores constataram que a madeira foi menos impactante. Nesse sentido, conclui-se que a depender do tipo de compósito de fibras vegetais, da sua aplicação e do produto em comparação, o compósito pode apresentar resultados vantajosos ou não.

3. Metodologia

Essa pesquisa usou como base a metodologia do GHG Protocol Brasil¹¹ para inventários de GEE e o Pensamento do Ciclo de Vida.²⁵ No entanto, o estudo se deteve a analisar qualitativamente as fontes de emissões de GEE dos Escopos I, II e III.

Foram investigadas a planta piloto do Laboratório de Polímeros no SENAI-CIMATEC (Salvador – BA) e a cadeia dos insumos envolvidos na fabricação do produto em análise, o capacete de obra (Figura 3). O capacete de obra, adotado como objeto da pesquisa, possui massa de 220 gramas quando usado o CFV, e de 210 gramas, quando produzido com 100% de polímeros.



Figura 3. Capacete de obra feito a partir do compósito de polipropileno e fibra de sisal

A composição do capacete de CFV difere com a de um capacete de matriz 100%

polimérica, pois o CFV tem 20% de fibras de sisal, com valores complementares de 2% do

agente de acoplamento e 78% de PP puro. Os testes realizados no Laboratório de Polímeros do SENAI-CIMATEC demonstraram que o percentual de 20% de fibras vegetais de sisal não comprometia o desempenho mecânico do produto.²⁶ O capacete produzido com 100% de matriz polimérica não é produzido na unidade do SENAI-CIMATEC, dessa forma, foi adotado um valor de massa com base em um capacete padrão.

No Laboratório de Polímeros do SENAI CIMATEC, as fibras de sisal utilizadas são advindas de Valente – BA, e são selecionadas após beneficiamento (batimento), representando as fibras de sisal do Tipo I (isentas de impurezas). A matriz do compósito utilizada é o polipropileno (PP), o agente de acoplamento é o polipropileno funcionalizado (PPF) com anidrido maléico. As fibras de sisal depois de cortadas passam por um processo de secagem em estufa elétrica à 80°C por um período de 6h, para diminuir o teor de umidade de 7% para 2%.

O método de Pensamento do Ciclo de Vida (PCV) envolve o entendimento de toda a cadeia produtiva, expandindo a modelagem ambiental da abordagem de Escopo I e II para o Escopo III. O mapeamento de toda a cadeia produtiva do capacete de PP puro e CFV com sisal é apresentado na próxima seção.

4. Resultados e Discussão

O ciclo de vida do capacete de obra começa na aquisição dos insumos na etapa

de Pré-manufatura. A produção dos insumos perpassa por uma extensa cadeia de produção que envolve a extração de diversos materiais da natureza, uso de insumos materiais e energéticos, geração de resíduo, emissões para o meio ambiente, processos armazenamento e transporte. A etapa de Manufatura usa os insumos da Pré-manufatura para produzir o produtos desejado. A etapa de Uso considera os insumos utilizados na manutenção do produto. A sua higienização é feita eventualmente usando um pano úmido, água e detergente. A etapa de Pós-uso é conhecida como o fim de vida do produto e envolve a gestão dos resíduos. Os processos de tratamento dos resíduos plásticos mais praticados são a reciclagem, a destinação no aterro sanitário ou a incineração. Os processos de tratamento dos resíduos são utilizados a fim de reduzir os impactos ambientais do descarte do produto no ambiente. Quando o material do capacete é reciclado, ele pode-se evitar o impacto ambiental da produção de insumos. A Figura 4 apresenta o ciclo de vida dos dois produtos de comparação.

A Manufatura do capacete é feita a partir da obtenção do PP ou CFV, seguindo para o processo de moldagem por injeção. O produto é embalado em saco plástico e transportado da fábrica até o ponto de venda, onde o consumidor se deslocará para adquirir o produto e entregá-lo no local de uso. A Figura 5 apresenta a modelagem qualitativa das entradas e saídas da etapa de Manufatura.

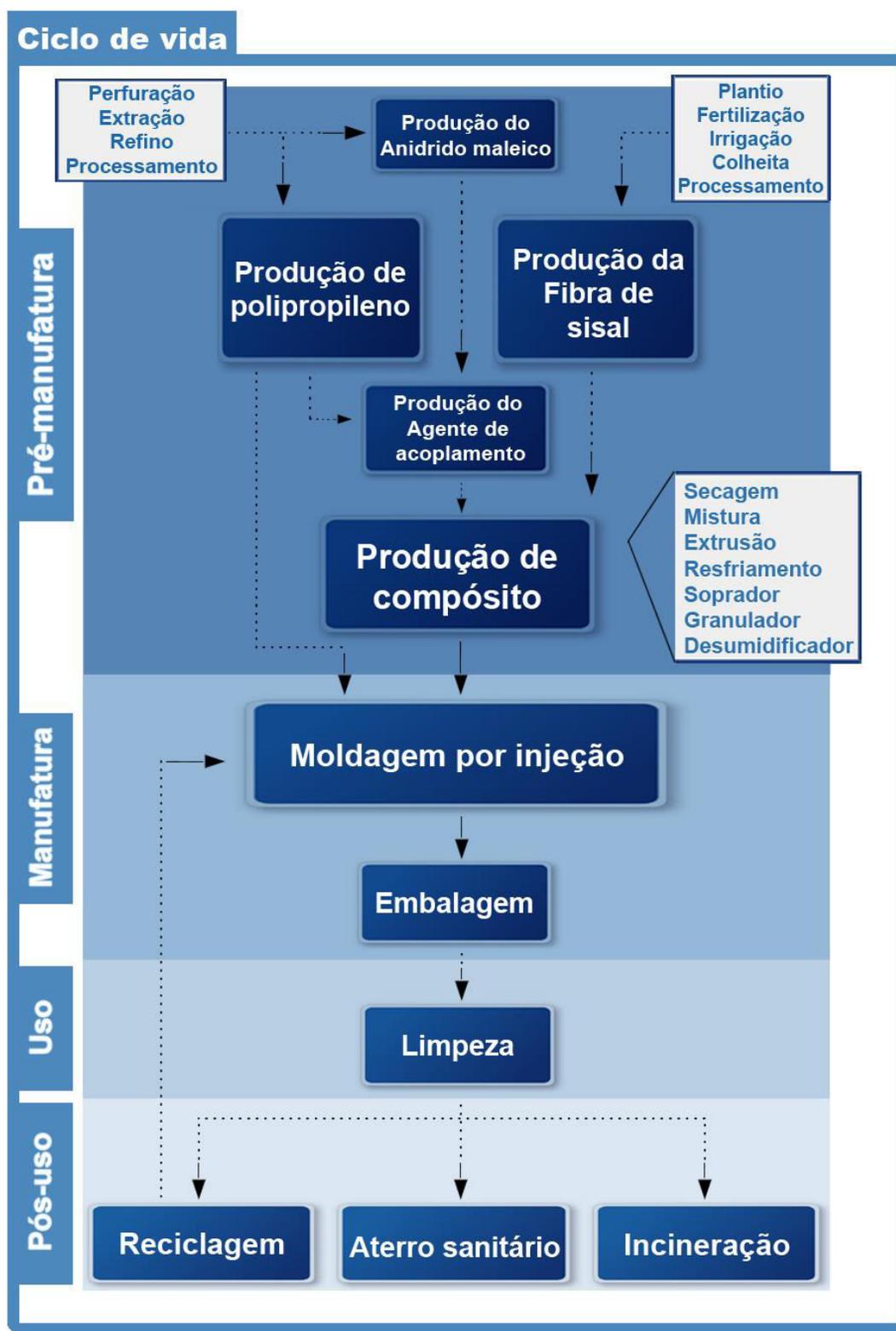


Figura 4. Ciclo de Vida do capacete de obras considerando os dois materiais de comparação: Polipropileno (PP) puro e o Compósito de Fibra Vegetal (CFV) com sisal

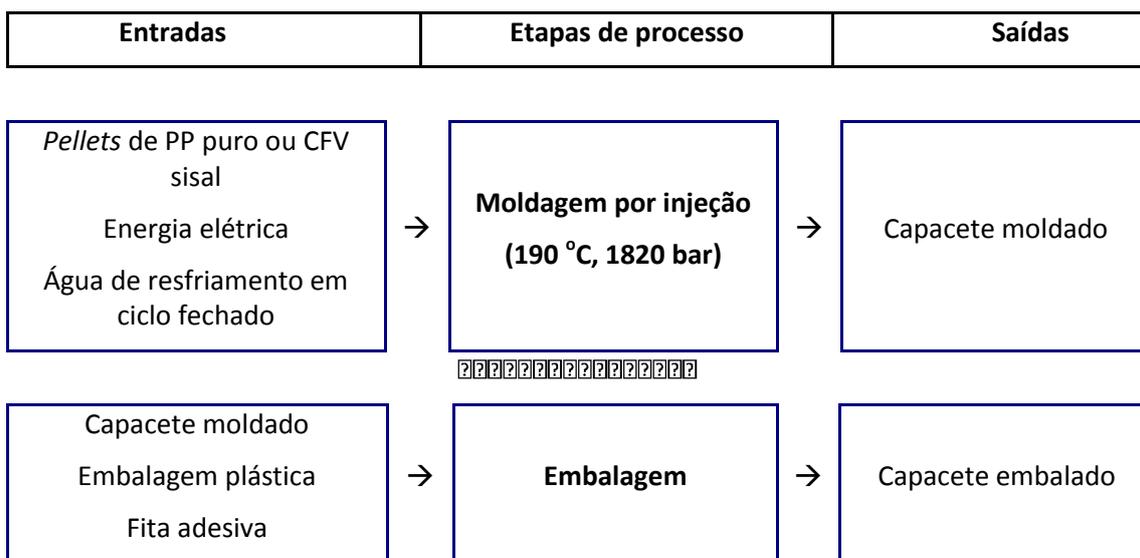


Figura 5. Manufatura do capacete de Polipropileno (PP) puro e o Compósito de Fibra Vegetal (CFV) com sisal

A eletricidade é um dos principais insumos em processos de produção e moldagem de produtos plásticos. Na produção dos CFV existem etapas adicionais de secagem e desumidificação que fazem uso de energia elétrica.

A análise das emissões de GEE do Escopo I da produção do capacete se restringe à etapa de Manufatura, visto que os outros insumos (ex. Pellet de PP ou CVF) são *commodities* e podem ser encomendados de qualquer lugar do mundo. Notamos que de acordo com a Figura 5 ambos os capacetes de obra, PP puro ou CFV, não emitem GEE diretamente. Os resíduos desse processo são embalagens dos materiais e efluente do resfriamento, não havendo emissões diretas de GEE. Assim, as emissões de GEE do Escopo I são nulas para ambos os capacetes.

As emissões de GEE oriundas da aquisição de energia, elétrica ou térmica, na etapa de Manufatura se caracterizam como abordagem de Escopo II. O processo de Manufatura consome apenas energia elétrica. O tempo de processamento na Moldagem por injeção da etapa de Manufatura é igual para ambos os produtos analisados, então em nível de comparação os

dois capacetes apresentam o mesmo impacto considerando os Escopos I e II.

A quantificação das emissões de GEE no Escopo III necessita do levantamento quantitativo de todo o inventário e suas respectivas emissões associadas ao longo do ciclo de vida do produto. O inventário do Escopo III inclui todos os processos de Pré-manufatura, Uso e Pós-uso.

Independente da quantificação das emissões de GEE de forma quantitativa em cada Escopo, nota-se que a diferença nas emissões de GEE da produção do capacete de PP em relação ao capacete de CFV é decorrente dos processos de Pré-manufatura e Pós-uso, visto que não há diferença considerável no impacto ambiental dos capacetes na etapa de Manufatura e Uso.

5. Conclusão

O pensamento do ciclo de vida e a quantificação das emissões dos produtos, a partir de diferentes abordagens de Escopo, são fundamentais para a implementação de medidas de redução dos GEE e outros

impactos ambientais. A inserção das fibras vegetais na matriz polimérica acarretaram em ganhos econômicos, por que a fibra de sisal custa R\$ 1,10/kg enquanto a matriz polimérica de PP custa em torno de quatro vezes mais.

O uso dos métodos de pensamento do ciclo de vida com as abordagens de avaliação das emissões de GEE do capacete de obra com PP e CFV constatou os Escopos I e II não são suficientes para comparar produtos distintos. A abordagem de Escopo I se restringe as emissões diretas da etapa de Manufatura. Nessa etapa não ocorreram emissões de GEE para ambos os produtos de comparação. A abordagem de Escopo II, que considerou os impactos do fornecimento de energia térmica e elétrica, contribuiu igualmente para os produtos de comparação devido ao tempo de processamento na Moldagem por injeção ser o mesmo para ambos os produtos. As diferenças entre os impactos dos produtos está na abordagem de Escopo III, onde existem diferentes processos de produção dos insumos na etapa de Pré-manufatura e Pós-uso. Portanto, não há diferença considerável em termos de emissões de GEE nas fases de Manufatura e Uso.

Observa-se que a cadeia produtiva do capacete produzido 100% com PP apresenta seus impactos ambientais associados às etapas de extração do petróleo até o seu beneficiamento para a produção do PP, enquanto o capacete produzido por CFV, tem-se um percentual de 2% da produção do agente de acoplamento (oriundo da cadeia do petróleo), 78% de PP e 20% de fibra de sisal.

Logo, recomenda-se quantificar as emissões de GEE associadas à cadeia do petróleo e à produção da fibra de sisal, através de uma avaliação do ciclo de vida (ACV) para comparar de forma absoluta as emissões de GEE no Escopo III do ciclo de vida do capacete de PP e CFV. Vale acrescentar que os 20% da fibra de sisal não necessariamente representa uma redução nas emissões de GEE do capacete CFV.

Agradecimentos

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela bolsa de pesquisa cedida ao estudante de Gestão Ambiental do SENAI CIMATEC, Ian Lucas Guimarães Rozados. A Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo apoio a pesquisa do estudante de pós-graduação em Engenharia Industrial da UFBA, Diego Lima Medeiros. Ao SENAI CIMATEC – BA pela infraestrutura do Laboratório de Polímeros.

Referências Bibliográficas

- ¹ Lacerda, L. D.; Marins, R. V.; Dias, F. J. S.; Soares, T. M. O Paradoxo Ártico: Impacto das Mudanças Climáticas Sobre Rios Árticos e do Semiárido Aumentam a Exportação de Mercúrio para o Oceano. *Revista Virtual de Química* **2012**, *4*, 456. [CrossRef]
- ² Carvalho, A. P.; Ferreira, P. C. G. Biotecnologia da Biodiversidade: Um Novo Instituto Brasileiro. *Revista Virtual de Química* **2013**, *5*, 328. [CrossRef]
- ³ Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (IPCC). Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, p. 7, 2014. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. Disponível em: <<http://www.ipcc.ch>>. Acessado em 15 de Maio de 2015.
- ⁴ Coelho, A.; Barbalho, E. S.; Escremin, J. V. Desenvolvimento de um Experimento sobre o Efeito Estufa: Uma Proposta para o Ensino. *Revista Virtual de Química* **2014**, *6*, 142. [CrossRef]
- ⁵ Souza, M. F. L.; Longhini, C. M.; Silva, A. M.; Lentini, C. A. D. Ciclo do Carbono: Processos Biogeoquímicos, Físicos e Interações entre Compartimentos na Baía de Todos os Santos. *Revista Virtual de Química* **2012**, *4*, 566. [CrossRef]

- ⁶ Ronconi, C. M.; Santos, T. C. Captura de CO₂ em Materiais Híbridos. *Revista Virtual de Química* **2014**, *6*, 112. [CrossRef]
- ⁷ Ministério de Ciência e Tecnologia (MCT). Estimativas anuais de emissões de gases de efeito estufa no Brasil. 2014. Brasília, 2a. edição. Disponível em <http://www.mct.gov.br/upd_blob/0235/235580.pdf><http://www.mct.gov.br/upd_blob/0226/226591.pdf>. Acessado em: 10 agosto 2016.
- ⁸ Bruckner, T. Em *Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change*; Edenhofer, O.; ed., Cambridge University Press: Cambridge, 2014, cap. 7.
- ⁹ BSI PAS:2050. How to carbon footprint your products, identify hotspots and reduce emissions in your supply chain. BSI copyright, 2011. Disponível em: <www.bsi-global.com/PAS2050>. Acessado em: 18 Março 2013.
- ¹⁰ Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (IPCC). Changes in Atmospheric Constituents and in Radiative Forcing, Chapter 2, p. 212, 2007. Disponível em <<http://www.ipcc.ch>>. Acessado em: 27 maio 2009.
- ¹¹ GHG Protocol Brasil. Especificações do Programa Brasileiro GHG Protocol: Contabilização, Quantificação e Publicação de Inventários Corporativos de Emissões de Gases de Efeito Estufa. Execução FGV CES (Centro de Estudos em Sustentabilidade) e WRI (World Resources Institute), **2010**. Disponível em: <<http://www.ghgprotocolbrasil.com.br>>. Acessado em: 18 Março 2013.
- ¹² Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) NBR ISO 14040:2009 – Gestão ambiental – Avaliação do ciclo de vida – Princípios e estrutura. (ISO 2006). [Link]
- ¹³ Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) NBR ISO 14044:2009 – Gestão ambiental – Avaliação do ciclo de vida – Requisitos e orientações. (ISO 2006). [Link]
- ¹⁴ United States Environmental Protection Agency (U.S.EPA). Basics of Green Chemistry. Disponível em: <<http://www2.epa.gov/green-chemistry/basics-green-chemistry#twelve>>. Acessado em: 11 Fevereiro 2014.
- ¹⁵ Ferreira, V. F.; da Rocha, D. R.; da Silva, F. C. Química Verde, Economia Sustentável e Qualidade de Vida. *Revista Virtual de Química* **2014**, *6*, 85. [CrossRef]
- ¹⁶ U.S. National Library of Medicine. Substance Name: Polypropylene. ChemIDplus A TOXNET DATABASE. Disponível em: <<http://chem.sis.nlm.nih.gov/chemidplus/rn/9003-07-0>>. Acessado em: 14 Maio 2015.
- ¹⁷ Reciclabrasil. Reciclagem PP: Características e Limitações. Disponível em: <<http://reciclabrasil.net/pp.html>>. Acessado em: 14 Maio 2015.
- ¹⁸ Callister, W. D.; *Ciência e engenharia de materiais uma introdução*, 5a. ed, Livros Técnicos e Científicos: Rio de Janeiro, 2002.
- ¹⁹ Rede do Plástico. Cotações de matérias primas do plástico. Disponível em: <<http://www.rededoplastico.com.br/cotacao-s-de-materias-primas-do-plastico/>>. Acessado em: 13 Fevereiro 2014.
- ²⁰ Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB). Sisal – safra 2012/2013: comercialização – proposta de ações. Disponível em: <http://www.conab.gov.br/OlalaCMS/upload_s/arquivos/12_10_29_11_45_31_sisal2012.pdf>. Acessado em: 17 dezembro 2013.
- ²¹ Rabello, M. S; Aditivação de polímeros, São Paulo: Artliber Editora, 2000.
- ²² Levy Neto, F.; Partini, L. C. Compósitos estruturais: ciência e tecnologia. 1a. ed., Edgard Blücher: São Paulo, 2006.
- ²³ Luz, Sandra M.; Caldeira-Pires, A; Ferrão, Paulo M. C. Environmental benefits of substituting talc by sugarcane bagasse fibers as reinforcement in polypropylene composites: Ecodesign and LCA as strategy for automotive components. *Resources, Conservation and Recycling* **2010**, *54*, 1135. [CrossRef]
- ²⁴ Bolin, C. A.; Smith, S. Life cycle assessment of ACQ-treated lumber with comparison to wood plastic composite decking. *Journal of Cleaner Production* **2011**, *19*, 620. [CrossRef]
- ²⁵ United Nations Environment Programme (UNEP). Greening the Economy Through Life Cycle Thinking. ISBN: 978-92-807-3268-9.

2012. Disponível em:
<[www.unep.fr/shared/publications/pdf/DTIx1536xPA-](http://www.unep.fr/shared/publications/pdf/DTIx1536xPA-GreeningEconomythroughLifeCycleThinking.pdf)

[GreeningEconomythroughLifeCycleThinking.pdf](http://www.unep.fr/shared/publications/pdf/DTIx1536xPA-GreeningEconomythroughLifeCycleThinking.pdf)>. Acessado em: 15 Maio 2015.

²⁶ Polkowski, R. D. O.; Dantas, J. V. Caracterização de Compósitos de PP com Fibras Curtas de Sisal: Efeito da Processo de

Corte das Fibras. 12º Congresso Brasileiro de Polímeros (12ºCBPol), 2013. Disponível em:
<<http://www.eventweb.com.br/cbpol/specifi>

[c-
files/manuscripts/index.php?file=cbpol/16117_1370963019.pdf](http://www.eventweb.com.br/cbpol/specifi)>. Acessado em: 15 Maio 2015.