CENTRO UNIVERSITÁRIO FEI
ISABELA FERREIRA NUNES

ESTUDO COMPARATIVO DO CICLO DE VIDA DE MATERIAIS UTILIZADOS EM PRODUTOS DE CUIDADOS PESSOAIS

São Bernardo do Campo
2020

ISABELA FERREIRA NUNES

ESTUDO COMPARATIVO DO CICLO DE VIDA DE MATERIAIS UTILIZADOS EM PRODUTOS DE CUIDADOS PESSOAIS

Trabalho Final de Curso apresentado ao Centro Universitário FEI, como parte dos requisitos necessários para obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Materiais. Orientado pela Prof.ª Dr.ª Patrícia Schmid Calvão.

São Bernardo do Campo

2020

ISABELA FERREIRA NUNES

ESTUDO COMPARATIVO DO CICLO DE VIDA DE MATERIAIS UTILIZADOS EM PRODUTOS DE CUIDADOS PESSOAIS

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

Comissão julgadora

_____

Orientador e presidente

_____

Examinador (1)

_____

Examinador (2)

São Bernardo do Campo

Data de aprovação

RESUMO

Em virtude da crise ambiental que a humanidade tem enfrentado nas últimas décadas e um crescente consumo de diversos tipos de produtos, é necessário que se conheçam os impactos ambientais causados pelo uso e descarte destes produtos. Por meio da ferramenta de Avaliação do Ciclo de Vida é possível contabilizar as demandas e as emissões oriundas de cada etapa do ciclo de vida dos produtos, quantificando os impactos ambientais que estes podem gerar. Neste trabalho foi realizada a avaliação do desempenho ambiental de dois produtos de cuidados pessoais: escovas de dente com cabo feito em bambu e cabo de polipropileno (PP) e cotonetes com hastes feitas de PP e papel. Foi realizada a comparação do desempenho ambiental dos materiais que compõem esses produtos. Foi utilizada a metodologia apresentada na norma ABNT NBR 14040 para realização das fases da avaliação de ciclo de vida. Os inventários de ciclo de vida (ICV) foram estruturados com base nos dados coletados no banco dos ICVs *ecoinvent* e no software GRANTA EduPack. A fase de avaliação dos impactos de ciclo de vida foi realizada no software openLCA, utilizando a metodologia *ReCiPe midpoint*. Foram avaliadas as categorias de impacto Mudança Climática e Esgotamento de Água. Concluiu-se que o PP é a melhor opção de material para fabricação dos cabos de escova de dente e hastes dos cotonetes. Para chegar em tal conclusão, foi considerado que este material apresentou menores impactos ambientais gerados pelo seu ciclo de vida, na categoria de Esgotamento de Água, quando comparado ao bambu, e nas categorias de Esgotamento de Água e Mudança Climática, ao compará-lo com o papel. Foram avaliados também os impactos ambientais da etapa final do ciclo de vida destes materiais e, por meio de uma ponderação entre as possíveis destinações e consequências atreladas a estas, observou-se também o PP como uma melhor opção no quesito desempenho ambiental.

Palavras-chave: Avaliação do Ciclo de Vida. Escova de dente. Cotonete. GRANTA EduPack. OpenLCA.

ABSTRACT

Due to the environmental crisis that humanity has to face in recent decades and an increasing consumption of different types of products, it is necessary to know the impacts caused by the use and disposal of these products. Through the Life Cycle Assessment tool, it is possible to account for the demands and those arising from each stage of the products' life cycle, quantifying the environmental impacts they can generate. This work was carried out to evaluate the environmental performance of two personal care products: toothbrushes with handles made of bamboo and handles made of polypropylene (PP) and cotton swabs with rods made of PP and paper. A comparison of the environmental performance of the materials that make up these products was carried out. The application presented in the ABNT NBR 14040 standard was applied to carry out the conditions of the life cycle assessment. The life cycle inventories (ICV) were structured based on data collected from the ecoinvent ICV bank and the GRANTA EduPack software. The life cycle impact assessment phase was carried out using openLCA software, using the ReCiPe midpoint methodology. They were evaluated as impact categories Climate Change and Water Depletion. It was concluded that PP is the best material option for the manufacture of toothbrush handles and swab sticks. To reach this conclusion, it was considered that this material presents less environmental impacts generated by its life cycle, in the category of Water Depletion, when compared to bamboo, and in the categories of Water Depletion and Climate Change, when comparing it with the paper. The environmental impacts of the final stage of the life cycle of these materials were also taken and, by weighing the possible destinations and consequences linked to them, PP was also observed as a better option in terms of environmental performance.

Keywords: Life Cycle Assessment. Toothbrush. Cotton swab. GRANTA EduPack. OpenLCA.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Geração total de RSU (t/dia) no Brasil, por região, de 2010 a 2018. 3
Figura 2 – Valores estimados da composição em massa dos RSU coletados no Brasil 6
Figura 3 – Estrutura da avaliação do ciclo de vida e possíveis aplicações 11
Figura 4 – Esquematização dos limites de um sistema de produto..... 13
Figura 5 – Exemplo de sistema de produto que contempla as etapas do berço ao portão 15
Figura 6 – Exemplo de ciclo de vida de produto que contempla as etapas do portão ao berço 16
Figura 7 – Unidade de repetição, mero, do polímero PP 22
Figura 8 – Exemplo dos produtos adquiridos, de cima para baixo: escova de dente com cabo de PP, escova de dente com cabo de bambu, cotonete com haste de PP e cotonete com haste de papel 26
Figura 9 – Sistema de produto da escova de dente com cabo de PP..... 29
Figura 10 – Sistema de produto da escova de dente com cabo de bambu..... 30
Figura 11 – Sistema de produto do cotonete com haste de PP 31
Figura 12 – Sistema de produto do cotonete com haste de papel 32
Figura 13 – Representação gráfica de um colmo de bambu 34
Figura 14 – Indicação das dimensões medidas do cabo de bambu..... 35
Figura 15 – Placa projetada com as dimensões medidas do cabo de bambu..... 35
Figura 16 – Diagrama de Consumo de água por emissão de CO_2 na produção primária 38
Figura 17 – Diagrama de Energia absorvida na produção primária por preço 40
Figura 18 – Gráfico de comparação entre o impacto gerado na Mudança climática, em kg CO_2 Eq., dos diferentes materiais utilizados em cabos de escovas de dente 49
Figura 19 – Gráfico de comparação entre o impacto gerado no Esgotamento de água, em m³, dos diferentes materiais utilizados em cabos de escovas de dente 51
Figura 20 – Gráfico de comparação entre o impacto gerado na Mudança climática, em kg CO_2 Eq., dos diferentes materiais utilizados em hastes de cotonete..... 52
Figura 21 – Gráfico de comparação entre o impacto gerado no Esgotamento de água, em m³, dos diferentes materiais utilizados em hastes de cotonetes 54

Figura 22 – Diagrama de calor de combustão (líquido) por emissão de CO_2 na combustão dos materiais PP e Bambu 56
Figura 23 – Diagrama de energia absorvida na reciclagem por emissão de CO_2 na reciclagem dos materiais PP e Papel 58
Figura 24 – Diagrama de calor de combustão (líquido) por emissão de CO_2 na combustão dos materiais PP e Papel 59

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Dados de massa coletados dos exemplares de produtos adquiridos.. 27
Tabela 2 – Função, unidade funcional e fluxo de referência estabelecidos para cada produto 27
Tabela 3 – Dados de uso de energia e emissão de CO_2 disponíveis no software GRANTA EduPack 33
Tabela 4 – Dados de emissão de CO2 na produção primária em kg/kg 39
Tabela 5 – Dados de consumo de água na produção primária em l/kg 39
Tabela 6 – Dados de energia absorvida na produção primária em MJ/kg 40
Tabela 7 – Valores médios de preço em reais por quilograma de 10.000 produtos 41
Tabela 8 – ICV do produto escova de dente com cabo de PP 42
Tabela 9 – Cálculo do número de cabos possíveis de serem usinados a partir da placa de bambu 43
Tabela 10 – Dimensões em milímetros dos paralelepípedos resultantes da divisão da placa em 20 partes 44
Tabela 11 – ICV do produto escova de dente com cabo de bambu 45
Tabela 12 – ICV do produto cotonete com haste de PP 46
Tabela 13 – ICV do produto cotonete com haste de papel 47
Tabela 14 – Impacto na Mudança Climática gerado pelo ciclo de vida do cabo de 10.000 escovas de dente 48
Tabela 15 – Impacto no Esgotamento de água gerado pelo ciclo de vida do cabo de 10.000 escovas de dente 50
Tabela 16 – Impacto na Mudança Climática gerado pelo ciclo de vida da haste de 10.000 cotonetes 52
Tabela 17 – Impacto no Esgotamento de água gerado pelo ciclo de vida da haste de 10.000 cotonetes 53
Tabela 18 – Dados relativos à etapa de disposição final dos materiais PP e Bambu 55
Tabela 19 – Dados relativos à etapa de disposição final dos materiais PP e Papel 57

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABCV	Associação Brasileira de Ciclo de Vida
ABIPLAST	Associação Brasileira da Indústria do Plástico
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABS	Acrilonitrila-butadieno-estireno
ACV	Avaliação de ciclo de vida
AICV	Avaliação de impacto de ciclo de vida
CB-38	Comitê Brasileiro de Gestão Ambiental
CFC	Clorofluorcarbonetos
EPDM	Etileno-propileno-dieno
FEI	Fundação Educacional Inaciana Padre Sabóia de Medeiros
GANA	Grupo de Apoio à Normalização Ambiental
GP2	Grupo de Prevenção da Poluição
GWP	*Global Warming Potential*
IBICIT	Instituto Brasileiro de Informação em Ciência e Tecnologia
ICV	Inventário de ciclo de vida
ISO	Organização Internacional para a Padronização
LCA	*Life Cycle Assessment*
LCI	*Life Cycle Inventory*
MMA	Ministério do Meio Ambiente
MRI	*Midwest Research Institute*
NBR	Norma Brasileira Regulamentadora
ONU	Organização das Nações Unidas
PA6	Poliamida-6
PBACV	Programa Brasileiro de Avaliação de Ciclo de Vida
PCV	Pensamento de ciclo de vida
PE	Polietileno
PET	Polietileno tereftalato
PP	Polipropileno
RSU	Resíduos sólidos urbanos
SBS	Estireno-butadieno-estireno
SEBRAE	Serviço Brasileiro de Apoio às Micro e Pequenas Empresas
SETAC	*Society of Environmental Toxicology and Chemistry*

SQA	Secretaria de Qualidade Ambiental
UNEP	Programa nas Nações Unidas para o Meio Ambiente
USEPA	*U.S. Environmental Protection Agency*
WWF	*World Wildlife Fund*

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 1

1.1 OBJETIVOS 3

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA 4

2.1 PROBLEMAS AMBIENTAIS RELATIVOS AO USO CRESCENTE DE MATERIAIS 4

2.2 AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA (ACV) 7

2.2.1 Pensamento do Ciclo de Vida 7

2.2.2 História 7

2.2.3 Conceitos Gerais da ACV 9

2.2.4 Normas Regulamentadoras e limitações da ACV 10

2.2.5 Fases de uma ACV 11

2.2.6 Ciclo de Vida de um produto 14

2.2.7 Exemplos de Aplicação de ACV 17

2.3 PRODUTOS DE CUIDADOS PESSOAIS 19

2.3.1 Escova de dente 19

2.3.2 Cotonete 21

2.4 MATERIAIS 22

2.4.1 Polipropileno 22

2.4.2 Bambu 23

2.4.3 Papel 23

3 METODOLOGIA 25

3.1 ANÁLISE DO DESEMPENHO AMBIENTAL DOS MATERIAIS 25

3.2 AVALIAÇÃO DE CICLO DE VIDA 25

3.2.1 Definição de objetivo e escopo 26

3.2.2 Sistemas de produto 27

3.2.3 Inventários de ciclo de vida 32

3.2.3.1 Escova de dente 33

3.2.3.2 Cotonete 36

3.2.4 Avaliação de Impactos de Ciclo de Vida (AICV) 36

3.3 AVALIAÇÃO DO FIM DO CICLO DE VIDA 36

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES 38

4.1 ANÁLISE DO DESEMPENHO AMBIENTAL DOS MATERIAIS 38
4.2 AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA 41
4.2.1 Inventários de ciclo de vida 41
4.2.2 Avaliação de Impactos de Ciclo de Vida (AICV) 47
4.2.2.1 Escova de dente 48
4.2.2.2 Cotonetes 51
4.3 AVALIAÇÃO DO FIM DO CICLO DE VIDA 54
4.3.1 Escovas de dente 54
4.3.2 Cotonetes 56
4.4 ANÁLISE CRÍTICA DOS RESULTADOS 59
5 CONCLUSÃO 63
REFERÊNCIAS 65

1 INTRODUÇÃO

Segundo Lowy (2012), a humanidade enfrenta uma grande crise da civilização capitalista industrial moderna. O sistema econômico capitalismo, por meio de seus mecanismos que incentivam e impulsionam a expansão ilimitada dos negócios, a supremacia da acumulação de capital e o consumismo exacerbado, acarreta a crise econômica e ecológica vivenciada.

Anualmente, desde 2006, é calculado o Dia da Sobrecarga da Terra (*Earth Overshoot Day*), data que representa o momento em que a demanda por recursos e serviços ecológicos supera o que o planeta poderia regenerar neste determinado ano. O déficit é registrado desde o início da década de 70 e, para o ano de 2020, esta data foi em 22 de agosto – registrando mais de 4 meses de consumo excedente à capacidade da Terra (EARTH OVERSHOOT DAY, 2020).

Enquanto este déficit é mantido, a dívida com o meio ambiente se acumula e os recursos vão se tornando escassos, mesmo os renováveis. Neste cenário, é necessária a atenção para um consumo apropriado destes recursos, considerando o ciclo dos materiais (CALLISTER JUNIOR; RETHWISCH, 2012).

Em 2002, na conferência Rio +10, fez-se a menção da necessidade de uma análise ampla de todo o processo produtivo de bens e serviços e do Pensamento de Ciclo de Vida (PCV). Trata-se de uma abordagem sistêmica para compreensão das consequências de cada escolha em todas as fases do ciclo de vida de uma cadeia de produção industrial, desde a obtenção da matéria-prima até o descarte final dos resíduos. O ciclo de vida está associado a todos os produtos e ao longo deste ciclo são causados impactos na sociedade, na economia e no meio ambiente, podendo ser positivos ou não (CALLISTER JUNIOR; RETHWISCH, 2012; UNEP, 2014).

Já na edição do Rio +20, foi reconhecida a necessidade de mudanças urgentes no padrão de consumo e produção da sociedade, visando para o mundo, a possibilidade do desenvolvimento sustentável. Compreende-se que por meio da implementação de medidas contrárias a esses padrões, é garantida a conservação da biodiversidade e ecossistemas, através da regeneração dos recursos naturais e de forma que não impede o crescimento global (ONU, 2012).

Neste contexto, a Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) se mostra muito relevante. Fundamentada nos conceitos do PCV, esta ferramenta analisa o

desempenho ambiental do ciclo de vida de um produto pela contabilização das entradas e saídas de materiais e energia do sistema, considerando a demanda de recursos, e emissões de CO_2, SO_x, NO_x, calor e resíduos. (ASHBY; SHERCLIFF; CEBON, 2007; IBICIT, 2020).

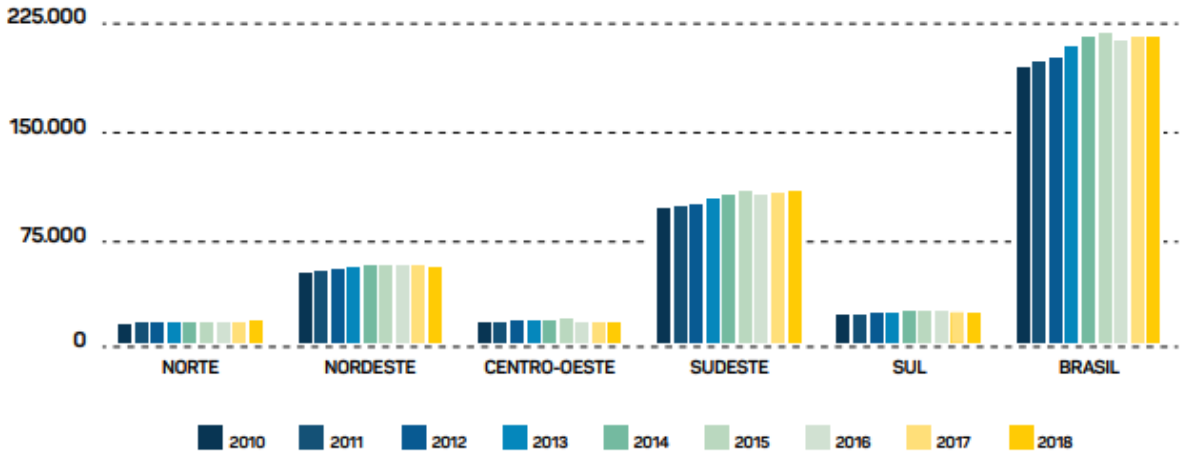
Com o conhecimento dos efeitos de cada fase de um ciclo de vida, diversos fatores podem ser repensados. Quanto à extração, por exemplo, pode-se considerar quais os materiais a serem utilizados, assim como qual o processo empregado para obtenção de suas matérias-primas. Na produção, o projeto de design do produto e seu método de fabricação. No pós-uso, deve-se avaliar a coleta, reuso e descarte (SEBRAE, 2017).

Para avaliar o crescimento desse consumismo exacerbado, o mercado mundial dos materiais poliméricos é um adequado representante. No período de 2017 para 2018, a produção de polímeros aumentou em cerca de 3%, atingindo a marca de 359 milhões de toneladas. O mercado europeu teve o segmento de fabricação de embalagens como o maior responsável pela totalidade de processos de manufatura de produtos plásticos. A resina polimérica mais consumida neste mercado foi o polipropileno, com uma demanda de quase 10 milhões de toneladas (PLASTICSEUROPE, 2019).

Dados apresentados pela WWF (*World Wildlife Fund,* 2019) estimam que cerca de 40% dos plásticos produzidos em 2016 são do tipo descartáveis, de uso único ou com vida útil de 3 anos. Exemplos de produtos que se encaixam nessa categoria são as embalagens diversas (alimentos, produtos de limpeza, cosméticos etc.), sacolas, e diversos produtos de higiene pessoal como cotonetes, escovas de dente, lâminas de barbear e absorventes menstruais.

Junto ao desenvolvimento acelerado dos municípios brasileiros e ao aumento do consumo desenfreado de produtos manufaturados e descartáveis há um crescimento significativo do montante de resíduos sólidos urbanos (RSU) gerados. Conforme observado na Figura 1, este valor tem uma tendência crescente em todo Brasil. Foi indicado que 79 milhões de toneladas de resíduos foram geradas em 2018, cerca de 1% a mais do que 2017. Em contrapartida, neste mesmo período, a população brasileira teve um crescimento de 0,4% (MMA; SQA, 2019).

Figura 1 – Geração total de RSU (t/dia) no Brasil, por região, de 2010 a 2018.



Fonte: MMA; SQA (2019)

No cenário global, estima-se que 2,01 bilhões de toneladas de RSU foram gerados em 2016 e, considerando a manutenção dos padrões de consumo como os atuais e proporcionalidade conforme crescimento populacional, é previsto que esse valor chegue a 3,4 bilhões de toneladas em 2050 (WHAT A WASTE 2.0).

1.1 OBJETIVOS

O objetivo deste trabalho consiste em utilizar a ferramenta ACV para análise do desempenho ambiental de diferentes produtos de cuidados pessoais. Para realizar comparações entre a utilização de diferentes materiais para suas fabricações, pretende-se estudar duas versões de produtos comercializados, compostos majoritariamente de polímeros sintéticos. Os produtos estudados são escova de dente e cotonete.

A realização deste Trabalho Final de Curso é justificada pela importância da compreensão dos impactos ambientais relativos ao ciclo de vida de um produto, assim como as funcionalidades da ferramenta ACV.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo serão contextualizados os problemas ambientais associados ao consumo crescente de materiais, em especial os materiais poliméricos. Também serão apresentados os conceitos referentes à ferramenta de gestão ACV, cujo entendimento é pertinente ao desenvolvimento do presente trabalho. Serão apresentados os produtos a serem estudados, assim como um panorama do seu consumo, produção ou descarte, os materiais que os compõem e os métodos de fabricação empregados para produzi-los.

2.1 PROBLEMAS AMBIENTAIS RELATIVOS AO USO CRESCENTE DE MATERIAIS

Dados apontados pela WWF (2019), em relatório sobre os problemas relativos ao aumento do consumo de materiais poliméricos, indicam que dos anos 2000 até o período de publicação, foi produzida a mesma massa total de polímeros que foi produzida em todos os anos anteriores ao ano 2000.

Estima-se que o montante de polímeros produzidos desde 1950 atinge a marca de 8,9 bilhões de toneladas e que apenas 29% desta totalidade ainda está em uso. Dos demais, 4,9 bilhões estão acumuladas em aterros sanitários ou descartados na natureza, 800 milhões de toneladas foram incinerados e apenas 600 milhões de toneladas foram reciclados (GEYER; JAMBECK; LAW, 2017).

Para cada produto fabricado e, posteriormente, descartado, faz-se necessário o consumo de recursos da natureza, gerando em todo o processo produtivo algum tipo de emissão (como gases de efeito estufa, contaminantes ao solo e água e resíduos sólidos). Tanto a extração de recursos naturais, quanto as emissões, são considerados impactos ambientais. Com o consumo exacerbado observado na sociedade contemporânea, principalmente a ocidental, tem-se um desequilíbrio ambiental crescente, pois essas extrações e liberações não são completamente absorvíveis pelo ecossistema e acumula-se um débito com o meio ambiente, sendo este limitado pelo esgotamento dos recursos naturais. Tratando-se de fontes de matéria e energia não-renováveis, a sua finitude é de fácil compreensão. Referindo-se aos recursos renováveis, deve-se avaliar se os

mecanismos naturais são capazes de regenerá-los em uma velocidade igual ou superior àquela em que estes são consumidos (MANZINI; VEZZOLI, 2002).

Outro efeito observado como consequência do consumismo é o aquecimento global. O equilíbrio térmico está sendo comprometido em razão da emissão de gases de efeito estufa, como os clorofluorcarbonetos (CFC), metano, ozônio e o dióxido de carbono. Dentre as fontes de emissão destes gases, há a combustão de petróleo, carvão e gás natural, processos esses que podem estar relacionados a etapa de produção primária de matéria-prima e ao transporte, por exemplo. Entende-se que com a ampliação desse fenômeno, consequências como o derretimento de calotas polares, o aumento do nível do mar e a desertificação podem comprometer severamente as condições de vida da fauna e flora. Gases como o CFC também são responsáveis pela redução da camada de ozônio, responsável pela absorção das radiações ultravioletas, danosas à saúde humana e à natureza (MANZINI; VEZZOLI, 2002).

Além dos impactos oriundos das numerosas produções de bens de consumo, há também a acidificação da água e dos solos que comprometem o crescimento das plantas; a poluição do ar, da água e dos solos, nociva ao ser humano e à natureza; e a eutrofia, que promove a monocultura, e compromete a agricultura (MANZINI; VEZZOLI, 2002).

Um outro grande problema associado ao uso crescente de materiais é o aumento do descarte de resíduos sólidos, bem como a forma em que estes são descartados. Com a crescente produção e a falta de lugares apropriados para a disposição destes resíduos, o gerenciamento da destinação dos resíduos não comporta sua destinação adequada. Tratando-se de resíduos na produção, a grande maioria dos materiais é reprocessado. As condições mudam quando observado o cenário dos resíduos domésticos. Além de depender da população para a separação correta dos materiais, a coleta, como mencionada, já não comporta a demanda como necessário. Com isso, mesmo os materiais recicláveis são descartados muitas vezes no meio ambiente (MANO; PACHECO; BONELLI, 2005 e ASHBY; SHERCLIFF; CEBON, 2007).

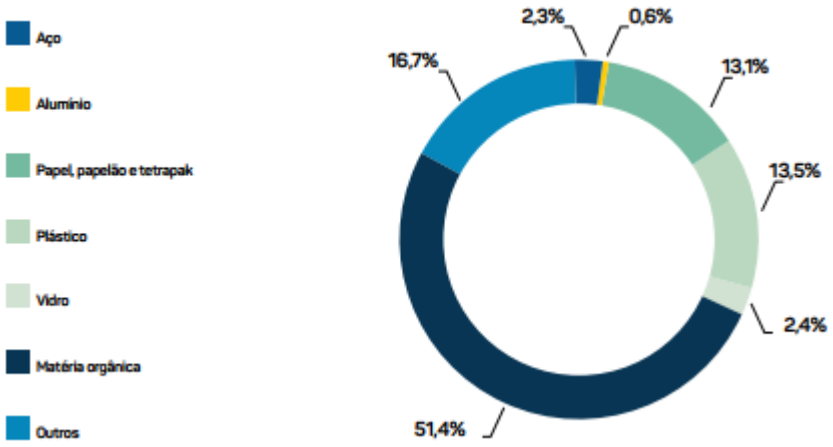
No Brasil, dos RSU coletados em 2018, apenas 59,5% foram destinados a aterros sanitários, local considerado como o mais adequado para a finalidade. Os demais resíduos coletados, 29,5 milhões de toneladas, foram descartados em locais inadequados que não dispõem de recursos para proteção da saúde humana e do

meio ambiente. Cerca de 6,3 milhões de toneladas de resíduos não foram coletadas. Esse montante é comumente descartado em locais impróprios, como vias públicas, rios ou terrenos e até mesmo são queimados de forma não controlada (MMA; SQA, 2019).

Qualquer tipo de destinação dos RSU apresenta vantagens e desvantagens, assim como há consequências ao meio ambiente. Em aterros, pode ocorrer a poluição do solo e dos cursos de água superficiais e subterrâneas; e a geração de gases e chorume provenientes da decomposição dos resíduos. Os lixões são depósitos de lixo não controlados que, além dos impactos gerados pelos aterros, também promovem a proliferação de vetores de doenças (MANO; PACHECO; BONELLI, 2005).

Como é possível observar na Figura 2, dos RSU coletados no Brasil, 51,4% é composto por matéria orgânica e apenas 32% é resíduo seco. A maior parte desses resíduos é descartada de forma misturada, comprometendo a possibilidade de aproveitamento desses materiais. A coleta seletiva ainda é pouco praticada, não atinge todos os municípios e nos municípios onde ocorre, não chega em todos os domicílios (MMA; SQA, 2019).

Figura 2 – Valores estimados da composição em massa dos RSU coletados no Brasil



Fonte: MMA; SQA (2019)

Neste contexto, faz-se necessário o conhecimento por parte de grandes instituições, empresas e da população em geral de quais são as consequências do

consumismo exacerbado e do descarte de resíduos no meio ambiente. Para tanto, é oportuna a utilização de ferramentas de gestão ambiental capazes de avaliar os impactos resultantes dos padrões de consumo praticados.

2.2 AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA (ACV)

Para definir a ferramenta ACV, serão conceituadas duas ideias que a precedem: ciclo de vida e o PCV. Posteriormente, será apresentado o seu contexto histórico, conceitos gerais, a norma que o regulamenta, suas limitações e as fases da construção de um estudo nessa metodologia. Por fim, serão apresentados exemplos de trabalhos que fizeram aplicação desta ferramenta.

2.2.1 Pensamento do Ciclo de Vida

As empresas têm a tendência de visualizar os negócios de forma tradicional, num modelo “business-as-usual” direcionado a custos e lucros, desconsiderando consequências não atreladas a questões financeiras diretas. Por conta da pressão exercida pelos crescentes movimentos pró-ambientais e legislações, essas têm passado a adotar uma diferente abordagem que pondera os impactos ambientais provenientes e relativos às suas atividades (MOTTA, 2016; SEBRAE, 2017).

Essa nova abordagem seria o PCV que objetiva a conscientização das inter-relações de cadeias produtivas, considerando as consequências geradas no meio ambiente pelo ciclo de vida de uma atividade industrial. Pode ser entendida como uma forma de pensamento sistêmico que pondera os impactos econômicos, sociais e ambientais, viabilizando a consideração da sustentabilidade em tomadas de decisões, seja por setores públicos ou privados (SEBRAE, 2017; IBICIT, 2020).

2.2.2 História

A primeira menção ao termo ACV, do inglês *Life Cycle Assessment* (LCA), ocorreu em 1990, entretanto os primeiros estudos foram iniciados durante a primeira crise do petróleo, na década de 60. Em 1969, quando o conceito ainda era denominado como *Resource and Environmental Profile Analysis*, o instituto MRI (Midwest Research Institute) analisou a demanda de recursos, as emissões e os

resíduos gerados pelo ciclo de vida de diferentes embalagens da Companhia Coca Cola. Este nunca fora divulgado por conta da confidencialidade das informações que o compunha (HUNT e FRANKLIN, 1996).

Cinco anos depois, o citado instituto realizou a análise dos impactos gerados por embalagens de cervejas reutilizáveis e não reutilizáveis a pedido da USEPA (U.S. Environmental Protection Agency), sendo este um estudo marcante para o desenvolvimento da ferramenta ACV (GUINÉE, 1995). Fez-se a caracterização de diversos materiais, como plástico, alumínio, aço, papel e vidro, avaliando grandes indústrias e seus fornecedores (HUNT e FRANKLIN, 1996).

Em 1972, o Clube de Roma apresentou um relatório dos Limites do Crescimento que questionava a busca pela expansão econômica e material com a previsão do colapso mundial devido ao consumo desequilibrado com as ofertas de recursos naturais. O grupo foi fundado, em 1968, por políticos, industriais e acadêmicos, a fim de determinar uma perspectiva global e de longo prazo dos possíveis problemas econômicos, ambientais, políticos e sociais capazes de comprometer o futuro da humanidade. O estudo divulgado foi vendido por todo o mundo e gerou comoção, impulsionando o movimento global de sustentabilidade (THE CLUB OF ROME, 2020).

Com o aumento do número de estudos de ACV realizados, um problema foi encontrado ao observarem diferentes resultados sendo obtidos para um mesmo produto. Frente a isso, o grupo Society of Environmental Toxicology and Chemistry (SETAC) promoveu, em 1989, um evento científico a fim de organizar as frentes de pesquisa direcionadas ao desenvolvimento da ACV. Isto se repetiu anualmente em países da Europa e América do Norte (IBICT, 2020).

Nos anos seguintes diversas instituições voltadas à ACV foram fundadas, juntamente ao lançamento de livros, guias e jornais científicos a respeito do assunto. A primeira norma foi divulgada em 1997 pela Organização Internacional para a Padronização (ISO), sendo essa a “ISO 14040 Environmental management – *Life Cycle Assessment – Principles and framework*” (IBICT, 2020).

O conceito de ACV chegou ao Brasil com a implantação de um subcomitê direcionado a este assunto no Grupo de Apoio à Normalização Ambiental (GANA), em 1993. Um de seus coordenadores, José Ribamar Chehebe, publicou em 1997 o estudo “Análise de Ciclo de Vida de Produtos: Ferramenta Gerencial da ISO 14000”,

sendo essa a primeira publicação nacional direcionada à essa ferramenta (SEO e KULAY, 2006).

Em 1998 foi fundado o Grupo de Prevenção da Poluição (GP2), na Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, com o objetivo de promover novos fundamentos quanto a gestão ambiental e prevenção a poluição, utilizando a metodologia ACV como linha de pesquisa principal. No mesmo ano, o GANA foi encerrado e suas atividades passaram a ser cumpridas pelo Comitê Brasileiro de Gestão Ambiental (CB-38) da ABNT (SEO e KULAY, 2006).

O subcomitê SC-05 da citada organização, sendo responsável permanente pela discussão de normas brasileiras a respeito de ACV, divulgou em 2001 a versão nacional da norma NBR ISO 14040 Gestão Ambiental – Avaliação do ciclo de vida – Princípios e estrutura. O grupo foi responsável pela adaptação de toda esta série de normas (SEO e KULAY, 2006; IBICT, 2020).

Após acordo entre setor empresarial, acadêmico e governamental, foi criada a Associação Brasileira de Ciclo de Vida (ABCV) no ano de 2002, com a intenção de construir um banco de dados nacional para apoio aos estudos de ACV, manter vínculos com organizações internacionais e capacitar pessoas à prática das avaliações (SEO e KULAY, 2006).

O Instituto Brasileiro de Informação em Ciência e Tecnologia (IBICT) adicionou a ACV em suas temáticas em 2003 e no ano seguinte se associou ao Laboratório Federal da Suíça para Ciência e Tecnologia de Materiais (EMPA) visando a capacitação de pessoal para o desenvolvimento da base de dados de Inventário de Ciclo de Vida nacional (IBICT, 2020).

Em 2010, o Conselho Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial do INMETRO lançou o Programa Brasileiro de ACV (PBACV) com objetivo de padronizar e disseminar informações de inventários e metodologias, apoiar a divulgação do Pensamento do Ciclo de Vida, participar da normalização nacional e internacional referentes ao tema e identificar os principais impactos ambientais do Brasil (INMETRO, 2020).

2.2.3 Conceitos Gerais da ACV

A ACV é uma ferramenta cuja finalidade é de identificar, de forma quantitativa e qualitativa, o desempenho ambiental de um produto. A avaliação é realizada a

partir da detecção das interações ocorridas entre o ciclo de vida do produto e o meio ambiente, assim como os potenciais impactos ambientais causados pelos processos acerca desse. (ABNT, 2001; SEO e KULAY, 2006).

A partir dos resultados numéricos oriundos desta abordagem “do berço ao túmulo”, é possível identificar quais são os pontos críticos no ciclo de vida de um produto, permitindo ações de melhoria a fim de minimizar os impactos consequentes (IBICT). Para realização de comparações entre produtos semelhantes há certa restrição consequente das limitações do desenvolvimento de ACV. Por uma questão de transparência, deve-se apresentar de forma clara quais as considerações e o contexto definido para cada estudo, como o período referente aos dados coletados, quais as unidades funcionais e a fronteira do sistema que abrange as fases do ciclo de vida. Caso estes sejam condizentes, é possível realizar comparações coerentes (ABNT, 2001).

Munidos destas informações, o governo pode atuar de forma a criar políticas públicas que promovam práticas sustentáveis, as indústrias podem se beneficiar com o uso do marketing, os pesquisadores podem aprimorar sua base de conhecimento com indicadores do desempenho ambiental de cadeias produtivas e projetistas podem utilizá-las para definir tomadas de decisões (ABNT, 2001).

2.2.4 Normas Regulamentadoras e limitações da ACV

A Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) desenvolveu a série de normas ISO 14040 que definem e regulamentam os princípios, estrutura, diretrizes e etapas de uma ACV. Conforme edição de 2001, esta ferramenta de gestão ainda se encontra em fase inicial, estando flexível para ser trabalhada de formas diferentes. Por conta disso, a dimensão do estudo segue as conformidades daquele que o desenvolve. A profundidade ou extensão com que um trabalho de ACV se distende depende diretamente de seus objetivos.

A ACV, assim como outras ferramentas de gestão ambiental, tem suas limitações. Em sua maioria, essa técnica não aborda questões sociais ou econômicas do ciclo de vida de um produto. Está sujeita à subjetividade das opções feitas pelo pesquisador, como a delimitação da região estudada, as fontes de dados utilizadas e as categorias de impacto escolhidas para análise. A acessibilidade de

dados, assim como suas validades, configura diretamente a qualidade dos estudos de ACV, podendo afetar sua exatidão (ABNT, 2001).

Com essas considerações, é recomendado que os resultados de uma ACV sejam utilizados apenas como parte de um conjunto de informações mais abrangentes em um processo de tomada de decisão (ABNT, 2001).

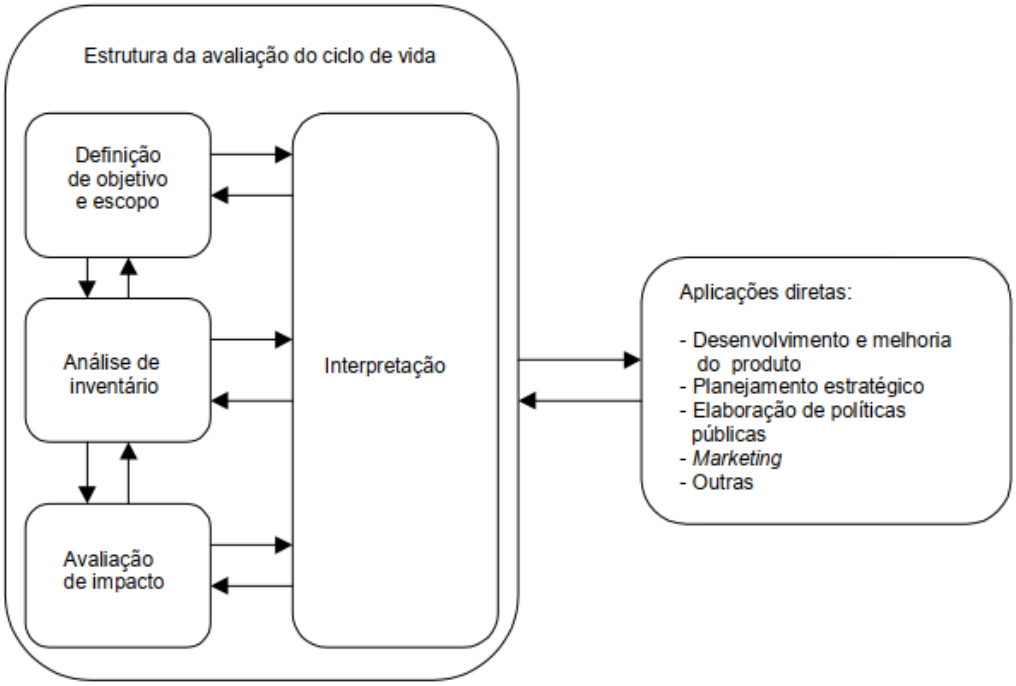
2.2.5 Fases de uma ACV

A norma NBR ISO 14040 (2001) instrui que as fases para a construção de uma ACV são:

1) Estabelecimento do seu objetivo e escopo;
2) Realização da análise de inventário de ciclo de vida (ICV);
3) Avaliação dos impactos;
4) Interpretação dos resultados alcançados.

Este processo, assim como possíveis aplicações deste modelo de estudo, estão apresentados na Figura 3.

Figura 3 – Estrutura da avaliação do ciclo de vida e possíveis aplicações



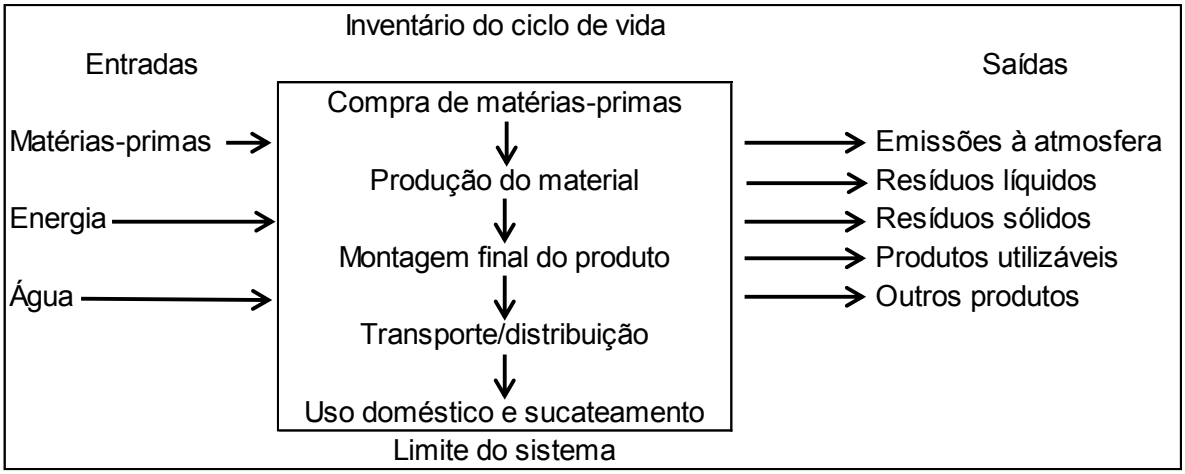
Fonte: ABNT (2001)

De acordo com Ferrante (2013) e ABNT (2001), na primeira fase, o objetivo deve apresentar claramente a motivação do estudo, a aplicação pretendida dos resultados a serem obtidos e o público-alvo destinado. Na construção do escopo deve-se:

- Definir qual ou quais os objetos de estudo;
- Descrever qual a função desse objeto para com a sociedade;
- Definir unidade funcional;
- Definir fluxo de referência;
- Apresentar as unidades de processo adotadas nos sistemas de produto;
- Apresentar o próprio sistema de produto, podendo ser em fluxograma;
- Delimitar as fronteiras temporais e geográficas do sistema;
- Apresentar os impactos e metodologia de avaliação que serão considerados;
- Descrever as limitações.

A fase de análise de inventário, considerada como a mais dificultosa, dá-se pela coleta de dados e cálculos para quantificação dos fluxos de energia e matéria do sistema de produto estudado, seguido da listagem das informações. Conforme o sistema de produto exemplificado na Figura 4, os itens de entrada de entrada de um processo podem ser materiais, como a matéria-prima, energia e água. Já como saída, podem ser emissões ao ar, resíduos líquidos ou sólidos, produtos utilizados e outros produtos. Cada um desses fluxos deve ser quantificado, de forma relacionada a cada uma das etapas contempladas no limite do sistema (ABNT, 2001; FERRANTE, 2013).

Figura 4 – Esquematização dos limites de um sistema de produto



Fonte: Autor "adaptado de" Ferrante (2013)

Na fase de avaliação dos impactos é feita a interpretação dos resultados da análise de inventário de forma qualitativa e quantitativa. Através desta, são mensurados os impactos ambientais de cada processo englobado no sistema de produto em estudo. Trabalhos de ACV podem atribuir valores aos impactos ambientais conforme categorias, a partir dos métodos utilizados para avaliação dos inventários (ABNT, 2001; FERRANTE, 2013).

Uma das categorias possíveis de serem avaliadas é a de mudança climática, que quantifica o Potencial de Aquecimento Global (*Global Warming Potential* – GWP) consequentes da emissão de gases de efeito estufa, podendo ter o seu valor apresentado em unidade de kg de CO_2 equivalente, por exemplo (LEVASSEUR, 2016)

Outra categoria de impacto seria o esgotamento de água. Também chamada de "Escassez Hídrica", diz respeito ao desequilíbrio entre a disponibilidade e a demanda de água. Pode ser quantificado quanto ao volume de água propriamente dito, uma escassez física, ou levar em consideração aspectos da qualidade da água e dificuldade de acesso (CASTRO *et al.*, 2019).

É uma categoria de impacto influenciada pela região a partir da qual está sendo referenciada, pois contabiliza não apenas o consumo de água demandado, como a disponibilidade. Portanto, para a análise de um mesmo processo, pode-se obter resultados maiores de esgotamento de água se a sua referência geográfica apresentar menores disponibilidades de água (CASTRO *et al.*, 2019).

Deve-se, então, definir as categorias de impacto ambiental a serem avaliadas no trabalho. Nos casos em que essa etapa é feita de forma manual, ou seja, sem a utilização de um software próprio para a finalidade, deve-se:

- Classificar os itens do inventário em categorias de impacto;
- Realizar a ponderação entre as categorias de impacto selecionadas e os dados do inventário, a partir de fatores de conversão já determinados cientificamente;
- Apresentar os potenciais impactos de forma que permita a comparação entre eles;
- Registrar e divulgar os resultados.

Há diversas metodologias já estruturadas para realização dessas etapas e é possível que sejam utilizadas dentro de softwares próprios para a realização de ACVs, como o openLCA, Umberto e SimaPro (ACV BRASIL, 2020).

Na etapa final de interpretação dos dados, faz-se a análise dos resultados de cada etapa anterior, buscando conclusões, indicando limitações encontradas no processo e apresentando recomendações para melhorias do desempenho ambiental dos produtos estudados. Deve-se também fazer a análise do trabalho de forma a avaliar se o seu desenvolvimento condiz com os objetivos e escopos (ABNT, 2001; FERRANTE, 2013).

Encerrado o estudo de ACV é apropriado que seja feita uma revisão crítica a fim de verificar se este satisfez os requisitos da Norma, tanto em relação à metodologia empregada, quanto aos dados coletados e a formulação do relatório (ABNT, 2001).

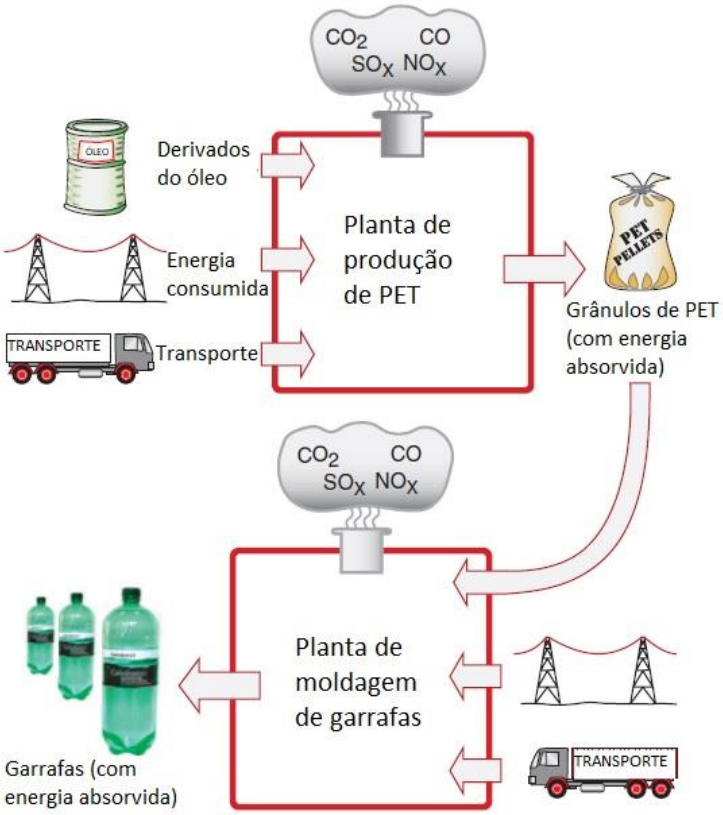
2.2.6 Ciclo de Vida de um produto

O ciclo de vida de um produto é composto por diversas fases. A primeira está relacionada à extração da matéria-prima, que pode ser feita de diferentes formas, como a mineração e a colheita de plantios. Quando necessário, estas são refinadas para obtenção dos materiais. A partir destes são processados os materiais “engenheirados”, que seriam tarugos de ligas metálicas, grânulos (pellets) poliméricos e pós cerâmicos, por exemplo. Através destes, fabrica-se os produtos consumíveis e estes são comercializados. Por sua vez, os produtos são utilizados

até que se encerre sua vida útil ou tornem-se antiquados. Seus componentes podem ser reciclados ou reutilizados, então retornando ao ciclo, ou descartados, assim o encerrando. (CALLISTER JUNIOR; RETHWISCH, 2012).

Estudos relacionados ao ciclo de vida dos produtos podem ser feitos considerando todas as etapas que o compõem ou apenas parte delas. Como exemplificado na Figura 5, este seria um sistema de produto que contempla as etapas do berço ao portão do processo de fabricação de garrafas PET, ou seja, desde a aquisição das matérias-primas até o processamento do produto final levado ao portão da fábrica (EUROPEAN COMMISSION, 2010).

Figura 5 – Exemplo de sistema de produto que contempla as etapas do berço ao portão



Fonte: Autor “adaptado de” Ashby (2007)

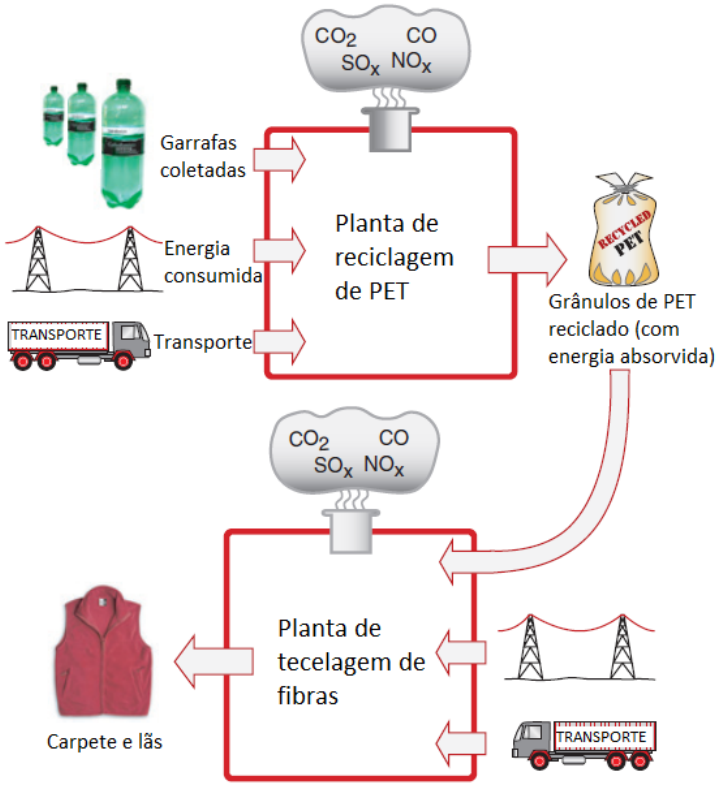
Na primeira etapa do sistema de produto observado na Figura 5, ocorre a produção primária dos grânulos de PET e, para isso é necessário um transporte da matéria-prima e a própria matéria-prima advinda do petróleo. O processo de

fabricação dos grânulos demanda energia e é responsável pela emissão de gases, como o CO_2, CO, SO_x e NO_x.

O produto dessa etapa, os próprios grânulos do PET, são então transportados para a fábrica responsável pelo processo seguinte. Com o consumo de energia, a garrafa PET é fabricada através do processo de injeção e sopro, emitindo gases ao meio ambiente (ASHBY, 2007).

Na Figura 6 têm-se o sistema de produto do portão ao berço, ou seja, após a fabricação do produto até o que seria a etapa final do seu ciclo de vida. Neste caso, o material das garrafas PET foram reciclados e, portanto, retornam ao ciclo de vida. Caso o produto fosse descartado simplesmente, sua disposição final seria considerada como o seu túmulo, representando o fim do seu ciclo de vida (EUROPEAN COMMISSION, 2010).

Figura 6 – Exemplo de ciclo de vida de produto que contempla as etapas do portão ao berço



Fonte: Autor “adaptado de” Ashby (2007)

Nesse sistema de produto há também o processo de fabricação dos grânulos, mas nesse caso o material de entrada são as garrafas transportadas para fábrica. É requerida energia para ocorrência desse processo e são emitidos gases ao ambiente. Seu produto, grânulos de PET, são transportados para o próximo local. Ocorre então o processo de fabricação das fibras poliméricas e a tecelagem das roupas. Como em todos os processos, esse também demanda energia e é responsável pela emissão de gases (ASHBY, 2007).

2.2.7 Exemplos de Aplicação de ACV

Como mencionado, uma das aplicações da ferramenta ACV é a comparação entre o desempenho ambiental de diferentes produtos de funcionalidades semelhantes. Um exemplo de trabalho nesta linha seria o artigo de Mujovo *et al.* (2013), que realizou a comparação entre embalagens de papel (cartão e papelão) e de plástico (polietileno, poliestireno e polietileno-tereftalato) para chocolate. Este foi dividido em cinco etapas principais: definição da unidade funcional; apresentação dos métodos de análise; delimitação do sistema de produto estudado; análise de ICV; interpretação.

Após a definição da unidade funcional para garantir a adequada comparabilidade entre as embalagens, foram apresentados os métodos de análise. Foram escolhidos como métodos de avaliação dos impactos: CML 2, de 1995, e ECO INDICATOR 99 *endpoint* H/H (MUJOVO *et al.,* 2013).

Os sistemas de produto estudados foram definidos com os seguintes processos elementares:

- Matéria-prima básica;
- Conformação da embalagem;
- Empacotamento do chocolate;
- Transporte para distribuição;
- Consumo;
- Transporte para aterros ou reciclagens.

Os dados de entrada foram coletados a partir dos projetos ELCD e ecoivent processes. A análise destes foi realizada com a utilização do software SimaPro (MUJOVO *et al.,* 2013).

A avaliação do impacto do ciclo de vida foi realizada através das informações catalogadas no ICV, utilizando os métodos de análise apresentados. Os resultados do estudo indicaram que o impacto ambiental causado pela embalagem de papel é maior do que a embalagem polimérica, pois dentre as 21 categorias de impacto analisadas, a embalagem polimérica teve um desempenho inferior em apenas 4: uso da terra, eco toxicidade de água fresca, eco toxicidade terrestre e radiação. Foi possível observar que a maior influência deste resultado foi primeira etapa do sistema de produto, relacionada aos materiais da embalagem (MUJOVO *et al.,* 2013).

Braskem (2015) realizou a avaliação comparativa do ciclo de vida de copos descartáveis de PP e copos reutilizáveis feitos de PP, vidro e cerâmica. Os processos contemplados nos sistemas de produtos foram: extração da matéria-prima, processamento do copo (transformação), distribuição, uso e descarte. Para definição dos fluxos de referência, foram considerados os processos de lavagem dos copos reutilizáveis.

Foi utilizado o banco de dados ecoinvent para obtenção dos valores a serem utilizados nos inventários de ciclo de vida, excetos dados de produção do PP, pois foram obtidos via questionários para própria empresa Braskem. O banco de dados ReCiPe “ponto médio” foi utilizado para acesso as categorias: transformação da terra, ocupação da terra e esgotamento da água. O método de avaliação dos impactos CML2 “ponto médio” foi escolhido para acesso às categorias:

- Esgotamento abiótico;
- Aquecimento global;
- Acidificação;
- Eutrofização;
- Depleção da camada de ozônio;
- Oxidação fotoquímica;
- Toxicidade humana;
- Ecotoxicidade.

Realizando a comparação entre os resultados da avaliação dos impactos, foi observado um melhor desempenho ambiental do copo descartável de PP, pois dentre as 11 categorias avaliadas, foi o produto com menor impacto em 6 dessas: ocupação da terra, transformação da terra, esgotamento da água, oxidação fotoquímica, toxicidade humana e eutrofização. Os perfis de desempenho ambiental dos demais produtos foram muito semelhantes e entendeu-se que as etapas de lavagem consideradas para os copos reutilizáveis tiveram expressiva influência nos resultados.

Foi então realizada a comparação entre os copos reutilizáveis, desconsiderando a etapa de uso. Nesse cenário, novamente o material PP se destaca por apresentar o menor impacto ambiental na maioria das categorias. Apenas depleção da camada de ozônio e esgotamento abiótico tiveram valores maiores apenas do que os do copo de vidro.

2.3 PRODUTOS DE CUIDADOS PESSOAIS

Nesta seção será apresentado um detalhamento a respeito dos produtos a serem estudados neste trabalho, uma breve consideração sobre suas histórias, como foram desenvolvidos, os materiais que os compõem, suas rotas de processamento e um panorama do seu consumo e descarte.

2.3.1 Escova de dente

O objeto classificado como a primeira escova de dentes foi encontrado em uma tumba egípcia, datado de cerca 5 mil anos de idade. Seu tamanho é similar ao de um lápis comum, feito de um ramo que teve sua extremidade desfiada para que as fibras obtidas servissem de cerdas. Conhecida como *chewing stick* (palito de mascar) ainda é utilizada por milhares de pessoas na África subsaariana e em culturas islâmica e hindu (VIRTUAL DENTAL MUSEUM; RODRIGUES, 2017).

Outro marco em sua história ocorreu no final do século XV na China. Eram utilizadas varinhas de bambus ou pedaços de ossos para fabricação das hastes e pelos de porcos como cerdas. O produto chegou na Europa no século XVII através de mercadores chineses e por conta do preço pelo qual eram comercializadas, muitas vezes uma única escova era dividida por toda família. Além do mofo gerado

pela umidade nas cerdas, estas eram pontiagudas e machucavam as gengivas, promovendo a proliferação de doenças entre os familiares (SUPER INTERESSANTE, 2018)

Ao passar dos séculos, foram desenvolvidos diversos modelos de escovas, variando o tamanho do cabo, das cerdas, do formato, textura e materiais. Esse produto foi apresentado de diversas formas, desde um item de luxo, com cabos ornamentados feitos de prata, até modelos infantilizados para crianças e versões dobráveis para viajantes (VIRTUAL DENTAL MUSEUM, 2017).

Com a aproximação da Segunda Guerra Mundial no final da década de 1930, os recursos da China foram se extinguindo, comprometendo o acesso às cerdas naturais que eram utilizadas até então. Neste contexto, o Japão apresentou as primeiras cerdas sintéticas registradas feitas de fios de viscose. No mesmo ano, a empresa estadunidense DuPont® anunciou uma nova cerda sintética de poliamida (VIRTUAL DENTAL MUSEUM, 2017).

As cerdas das escovas de dentes comercializadas atualmente são compostas por poliamida-6 (PA6). Já os cabos, podem ser encontrados com material principal sendo o polipropileno (PP), polietileno (PE), blendas entre PP e PE, acrilonitrila-butadieno-estireno (ABS) ou bambu. Nas escovas de cabo polimérico, é comum encontrar modelos com alguma região emborrachada, sendo esta borracha feita de estireno-butadieno-estireno (SBS) ou etileno-propileno-dieno (EPDM). Para a fixação das cerdas na cabeça da escova, são utilizadas pinças de material metálico, usualmente o alumínio (NETTO; SOUZA, 2017; COGDELL, 2014).

Os cabos das escovas de dente poliméricas são feitos pelo processo de injeção a partir das respectivas matérias-primas em grânulos (pellets). Para aquelas com partes emborrachadas, uma segunda etapa de injeção é realizada, promovendo adesão química e mecânica entre os materiais injetados. Posteriormente, as cerdas são insertadas nos orifícios e fixadas no cabo com o auxílio de pinças metálicas. Em seguida, as cerdas são aparadas para definição do formato proposto e para dar o acabamento necessário (MADE HOW, 2020b).

De forma geral, o processo de fabricação dos cabos de escova de dente feitos de bambu consiste em: colheita da matéria-prima, corte das seções de material a ser processado; etapas de usinagem grosseira para desbaste, seguida de etapas de usinagem fina e polimento; secagem e tratamento superficial para

minimizar absorção elevada de umidade (BAMBOOBRUSH, 2020; KYUNG-TAE; GEUN-WOO; EUN-SEOP, 2019).

2.3.2 Cotonete

O cotonete foi desenvolvido por Leo Gerstenzang (1892 - 1973), inventor polonês-americano, na década de 1920, após reparar sua esposa utilizar um pedaço de algodão preso na ponta de um palito de dente para higienizar os ouvidos de seu filho (Q-TIPS®, 2020).

Ao longo do tempo diversas mudanças foram feitas, entre elas: o material da haste, inicialmente de madeira, passou a ser de papel; a embalagem foi remodelada para poder ser manipulada com apenas uma mão – visando a praticidade de utilizá-la enquanto segura um bebê; o nome do produto foi adaptado, retirando "*Baby Gays* e mantendo apenas "*Q-Tips®*", visando ampliar seu nicho comercial (ENCYCLOPEDIA.COM, 2020).

Em 1963, foi desenvolvida e comercializada uma versão com hastes poliméricas (SUPER INTERESSANTE, 2020) e em 65, a empresa *Johnson & Johnson* trouxe o produto ao Brasil com a marca COTONETES® (JOHNSON & JOHNSON, 2020). Apesar do termo ser uma marca registrada, a palavra "cotonete" já foi adotada na língua portuguesa, já sendo encontrada em dicionários (COTONETE, 2020).

Os cotonetes comercializados atualmente são compostos por algodão na parte absorvente em suas extremidades. As hastes, por sua vez, podem ser encontradas em modelos feitos por polímero PET, PP, papel e madeira. (Q-TIPS®, 2020).

As hastes feitas a partir de polímeros são processadas a partir da extrusão destes materiais, seguida de uma etapa de cortes em suas pontas para produção de asperezas. Já as hastes de papel consistem em um pedaço retangular de uma folha, enrolada de forma justa e colada em suas extremidades. Após esta primeira etapa do processamento, as hastes são carregadas pela linha de produção para etapa de aplicação do algodão e, por fim, o empacotamento (MADE HOW, 2020).

Considerando aspectos da relação desse produto com o meio ambiente, têm-se o dado de que apenas durante o ano de 2017, foi contabilizada a produção

mundial de 543,75 bilhões de unidades de cotonetes e este valor está previsto para crescer em 3,4% do período de 2018 para 2026 (WILL, 2017).

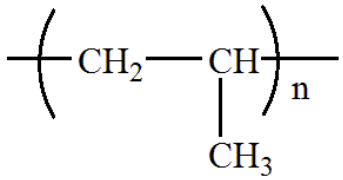
2.4 MATERIAIS

Nesta seção serão apresentados os materiais poliméricos que compõem os produtos a serem estudados no presente trabalho, assim como informações referentes a suas principais propriedades e alguns dados quanto sua produção, consumo e descarte.

2.4.1 Polipropileno

O polipropileno (PP) é um polímero termoplástico. Seu mero, observado na Figura 7, é oriundo de monômeros de hidrocarbonetos alifáticos insaturados e, portanto, este material é classificado como poliolefina. Sua tensão de escoamento e dureza crescem linearmente conforme aumento do grau de cristalinidade, e essa propriedade tem grau máximo próximo de 65% (MANO; MENDES, 2004; CANEVAROLO JUNIOR, 2006).

Figura 7 – Unidade de repetição, mero, do polímero PP



Fonte: Rodrigues (2018)

É considerado como um polímero de excelente resistência química, propriedades mecânicas moderadas e excelente resistência a radiações eletromagnéticas (MANO; MENDES, 2004). Por conta de suas propriedades e relativo baixo custo, é amplamente utilizado para diversas finalidades e, de acordo com pesquisa da PlasticsEurope (2017), a maior demanda deste material no ano de 2018 foi para o setor de embalagens.

Conforme dados apontados na pesquisa publicada por Geyer, Jambeck e Law (2017), no ano de 2015 foi o polímero mais produzido, chegando à marca de aproximadamente 68 milhões de toneladas.

No mesmo período, foi o segundo polímero mais descartado, com valores de 55 milhões de toneladas, perdendo apenas para o polietileno de baixa densidade (PEBD) (CHAVES, 2019).

Dentre as 757.654 toneladas de material plástico reciclados pós-consumo em 2018, o PP representa 15% desta massa, segundo dados da Abiplast (2019).

2.4.2 Bambu

O bambu é um material natural, não considerado como uma madeira e sim como um tipo de grama. Cresce principalmente na região equatorial do globo, sendo a China e a Índia os seus maiores produtores. Tem uma característica de crescimento extremamente rápido, podendo atingir alturas de 20 a 30 metros em um período de 4 a 6 meses. Dentre as suas múltiplas aplicações, uma que se destaca por requerer propriedades mecânicas elevadas é a área da construção civil. Para essa finalidade, é possível realizar a sua colheita em um período entre 4 e 7 anos. (ASHBY, 2016; LIEBL NETO, 2017).

Dados de 2007 apontam que a produção mundial de bambu chegou a aproximadamente 1,4 bilhões de toneladas neste período, correspondendo a um comércio internacional de U$ 2,5 bilhões (ASHBY, 2016).

É considerado como um material sustentável, capaz de promover estabilidade química para terras de plantio, captar e armazenar carbono e ser facilmente utilizado como biomassa (ASHBY, 2016).

2.4.3 Papel

O papel é um produto advindo da madeira, composto por fibras celulósicas. Dentre os produtos feitos a partir do papel, no geral são diferenciados de acordo com sua gramatura, ou seja, pela massa (g) correspondente a 1 m² do material, pela sua espessura e por sua rigidez. Tem a capacidade de ser reciclado, mas esse processo pode ser impedido pela presença de qualquer impureza (MANO; PACHECO, 2005)

A matéria-prima do papel, celulose, é obtida a partir do polpeamento da madeira. O produto desse processo tem a coloração marrom, então são realizados processos de lavagem, branqueamento da celulose e recuperação química. Para fabricação do papel, utiliza-se essa matéria-prima e diversos aditivos para conferir as propriedades desejadas. A massa de celulose é preparada, refinada e depurada (para remoção de aglomerados de fibra e possíveis impurezas). Na máquina de papel, finalmente, os papéis são processados. Conforme finalidade, podem ser realizados tratamentos superficiais e de acabamento (GALDIANO, 2006).

Considerando a composição estimada dos RSU coletados no Brasil, o papel corresponde a 13,1% do montante. Do total de resíduos secos de papel, cerca de 68% destes foram reciclados em 2018 (MMA; SQA, 2019).

3 METODOLOGIA

A metodologia deste trabalho seguirá, sobretudo, as recomendações das normas NBR ISO 14040. A seguir, serão apresentados os constituintes requeridos nas fases do estudo de ACV e as hipóteses adotadas.

3.1 ANÁLISE DO DESEMPENHO AMBIENTAL DOS MATERIAIS

Para realização da análise do desempenho ambiental dos materiais, foram utilizados os recursos do software GRANTA EduPack 2020. Trata-se de uma ferramenta para seleção e análise das propriedades de materiais e processos. Foi utilizada a versão 20.1.0 e a base de dados de sustentabilidade nível 3.

Foram pesquisados, no banco de dados do software, os materiais que correspondessem àqueles estudados no presente trabalho. Entre as opções de bambu disponíveis, foi escolhido o bambu (longitudinal) pois corresponde ao sentido do alinhamento observado nos exemplares de escovas adquiridos. Para o papel, foi escolhido o papel a base de celulose, pois entre as opções foi a que apresentou informações gerais que mais se aproximaram ao produto adquirido.

Para o material PP procurou-se por homopolímero e foram encontradas duas opções: de alta e de baixa fluidez, sendo o primeiro correspondente ao material utilizado na injeção dos cabos de escova de dente e o segundo, hastes extrudadas do cotonete, já que a fluidez é característica relativa ao processamento dos material. Ao comparar os valores das propriedades relativas ao desempenho ambiental, nota-se que os valores são iguais para ambos, portanto, estes materiais serão citados como PP unicamente nas seguintes seções, evitando repetitividade nas informações apresentadas.

Foram obtidos diagramas com propriedades relativas ao processamento primário dos materiais e seu custo para realizar as devidas discussões acerca dos resultados encontrados.

3.2 AVALIAÇÃO DE CICLO DE VIDA

A seguir serão apresentadas as seções relativas a realização da ACV.

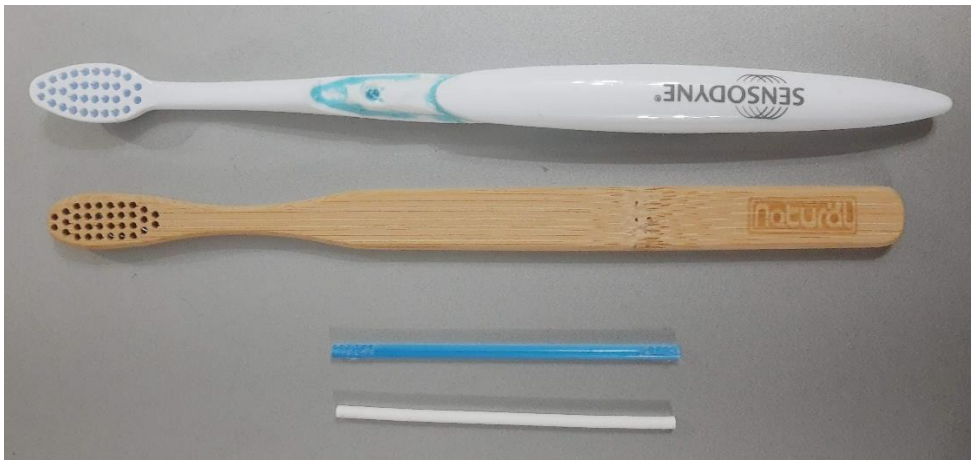
3.2.1 Definição de objetivo e escopo

Este trabalho tem como principal objetivo a utilização da metodologia ACV para avaliação do desempenho ambiental de escovas de dente e cotonetes, comparando a utilização de dois tipos de materiais para cada produto.

Por se tratar de um trabalho comparativo, optou-se por avaliar apenas os materiais que compõem os cabos e hastes destes produtos, pois os demais materiais utilizados em suas fabricações são coincidentes. Portanto, no caso da escova de dente, será avaliada a versão do produto com cabo de PP e com cabo de bambu. Para o cotonete, a comparação será feita entre a haste de PP e a haste de papel.

Para definição dos valores de massa dos componentes dos produtos, alguns exemplares destes foram adquiridos, como os exemplos expostos na Figura 8, e pesados em balança analítica Ohaus Adventurar ARC120. Foram selecionados produtos que em sua embalagem houvesse informações claras dos materiais que os compunham, eliminando possibilidade de inconsistências relativas a esse fator.

Figura 8 – Exemplo dos produtos adquiridos, de cima para baixo: escova de dente com cabo de PP, escova de dente com cabo de bambu, cotonete com haste de PP e cotonete com haste de papel



Fonte: Autor

Na Tabela 1 é possível observar os resultados das medições e dos valores médios calculados. Visando a obtenção da massa apenas dos materiais a serem estudados, um estilete foi utilizado para remoção dos algodões das pontas dos

cotonetes e da borracha dos cabos das escovas e alicates foram utilizados para remoção das cerdas e pinças metálicas.

Tabela 1 – Dados de massa coletados dos exemplares de produtos adquiridos

Produto	Material do componente	Modelo	Massa 1 (g)	Massa 2 (g)	Média (g)	σ
Escova de dente	Cabo de PP	Marca A	9,48	9,59	10,63	1,269
		Marca B	11,80	11,66		
	Cabo de bambu	Marca C	8,87	8,77	8,82	0,071
Cotonete	Haste de PP	Marca D	0,18	0,17	0,17	0,005
		Marca E	0,17	0,17		
	Haste de papel	Marca F	0,31	0,29	0,30	0,014

Fonte: Autor

Na Tabela 2 é possível observar os parâmetros função, unidade funcional e fluxo de referência considerados para realização da ACV. Os valores de massa média obtidos foram utilizados para o cálculo do fluxo de referência, considerando a unidade funcional de 10.000 produtos.

Tabela 2 – Função, unidade funcional e fluxo de referência estabelecidos para cada produto

Produto	Escova de dente		Cotonete	
Material	PP	Bambu	PP	Papel
Função	Escovação dentária		Limpeza superficial e externa dos ouvidos	
Unidade funcional	10.000 usuários com uso por 3 meses		10.000 usuários com uso único diário	
Fluxo de referência (kg)	106,3	88,2	1,7	3,0

Fonte: Autor

3.2.2 Sistemas de produto

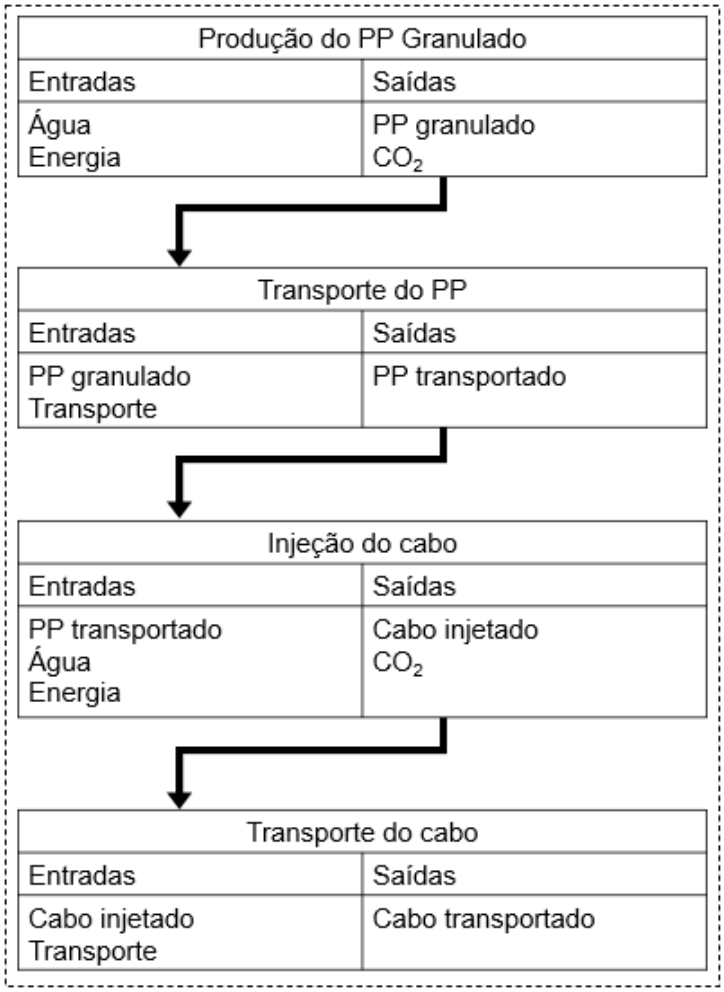
A fronteira dos sistemas de produto foram delimitas de forma a contemplar a produção primária dos materiais, o transporte do material para o local de

processamento, o processamento do produto e o transporte do produto para pontos de comercialização. As fronteiras e a elaboração do sistema de produto foram estabelecidas de forma a equiparar da melhor forma possível os processos dos produtos, visando o não comprometimento da comparação entre seus desempenhos ambientais, considerando as limitações de dados disponíveis nos softwares para elaboração das ICVs.

De acordo com consideração realizada em trabalho de Braskem (2015), foi adotada a distância de 150 km como padrão para cada transporte, a fim de equiparar esta referência para fins de comparação e como meio de transporte, o caminhão. Entende-se que a adoção desta distância supre as necessidades condizentes ao presente trabalho, mas que para o objetivo de avaliar cada sistema de produto individualmente, a fim de definir seus pontos críticos, é necessário que dados mais próximos da realidade sejam levantados e utilizados como referência para os devidos cálculos de fluxo de energia e matéria nesta citada etapa.

O sistema de produto da escova de dente com cabo de PP, observado na Figura 9, contempla a produção do PP granulado, ou seja, em pellets, o transporte dessa matéria-prima para o local de fabricação das escovas, o processo de injeção dos cabos e seu transporte até o local de distribuição do produto para consumo.

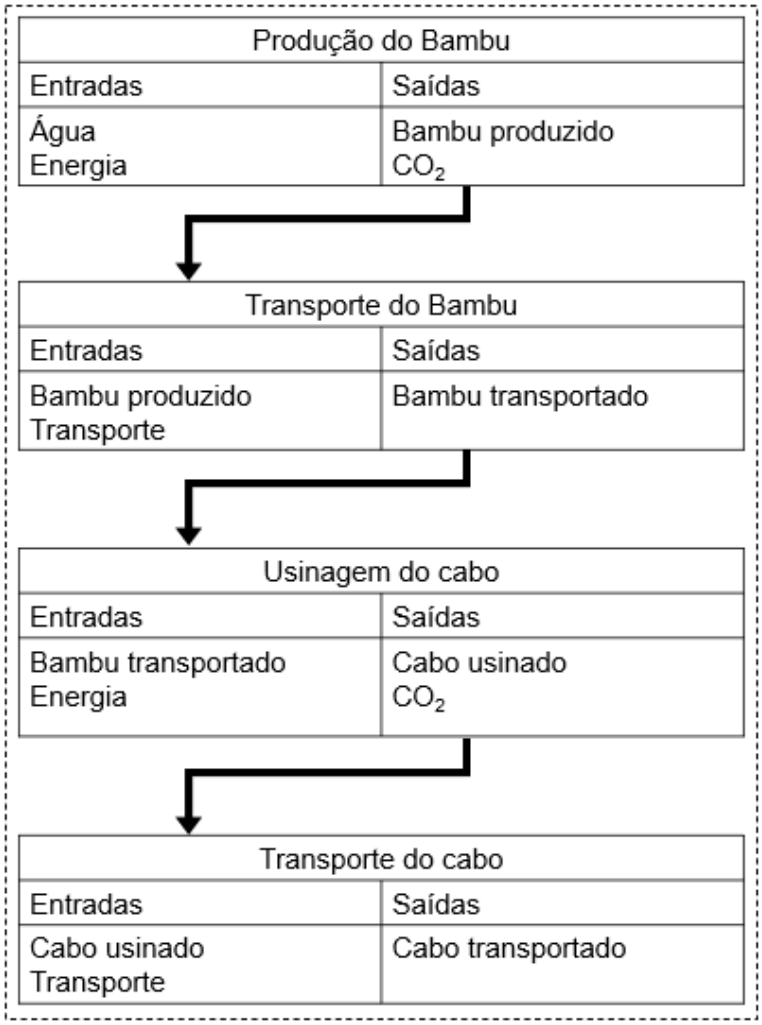
Figura 9 – Sistema de produto da escova de dente com cabo de PP



Fonte: Autor

Para a escova de dente com cabo de bambu, os processos de seu sistema de produto, observado na Figura 10, são respectivamente a produção do bambu, transporte do material, usinagem do cabo e transporte do produto. Nesse caso, não há a água como fluxo elementar no processamento do cabo, dada inexistência desse dado no software GRANTA EduPack.

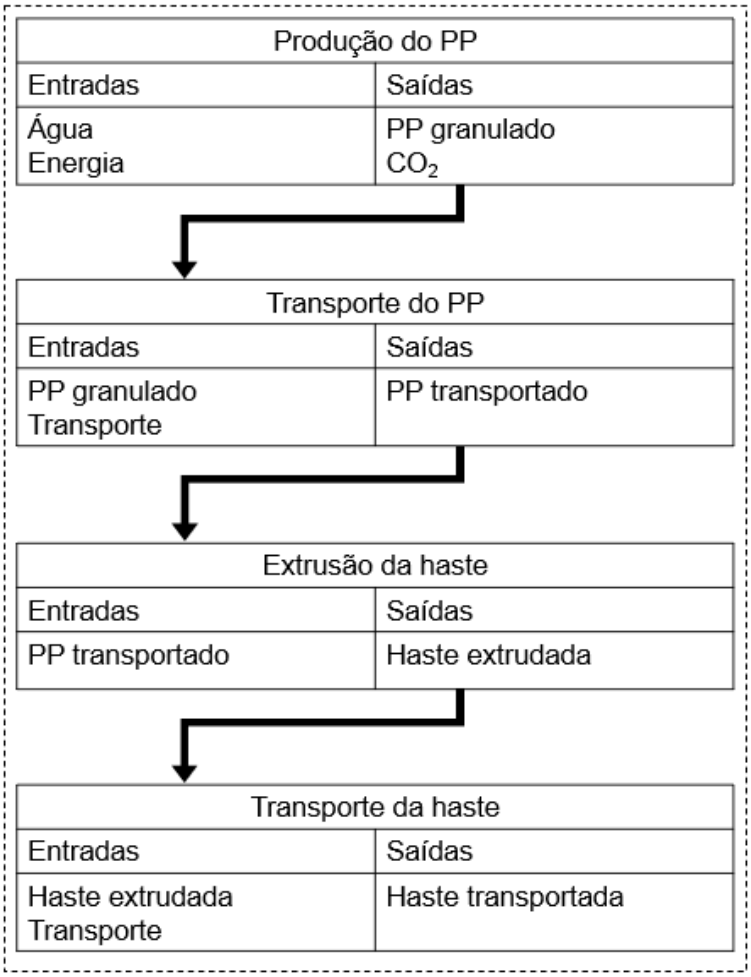
Figura 10 – Sistema de produto da escova de dente com cabo de bambu



Fonte: Autor

No caso do sistema de produto do cotonete com cabo de PP, observado na Figura 11, os processos incluídos foram produção do PP granulado, transporte desse material, extrusão da haste e transporte dessa para centros comerciais.

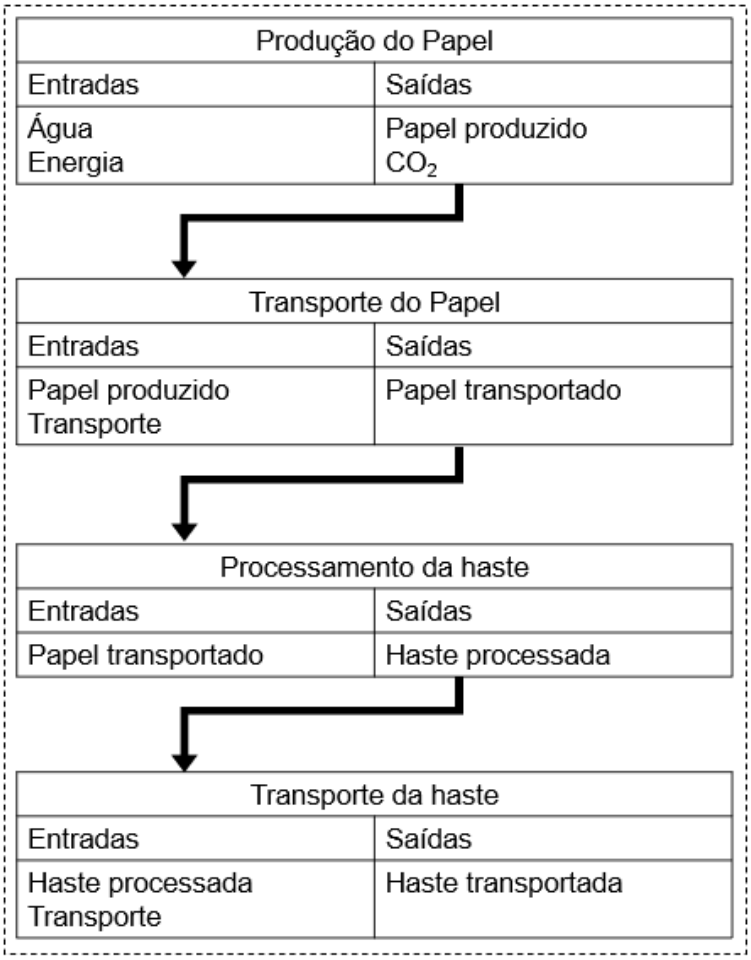
Figura 11 – Sistema de produto do cotonete com haste de PP



Fonte: Autor

O sistema de produto do cotonete com haste de papel, observado na Figura 12, é formado também por quatro processos: produção e transporte do papel, processamento e transporte da haste.

Figura 12 – Sistema de produto do cotonete com haste de papel



Fonte: Autor

Na etapa de processamento da haste, tanto do material PP quanto do papel não foram apresentados os fluxos de água, energia e CO_2 nos fluxogramas. A justificativa para citada decisão será apresentada no tópico Inventário de Ciclo de Vida da seguinte seção.

3.2.3 Inventários de ciclo de vida

O levantamento e análise de dados no desenvolvimento deste trabalho foram feitos através da utilização do software GRANTA EduPack e do openLCA, versão 1.10.3 desenvolvido por GreenDelta. Este é um software de código aberto próprio para realização de ACVs.

Para utilização do openLCA, os bancos de dados devem ser importados de fontes externas. Para tanto, optou-se pelo “ecoinvent 3.7 Cutoff LCI”, como banco

de dados de ICV, e o “ecoinvent 3.7 LCIA methods”, como banco de dados de metodologias de ACV.

Para construção dos ICVs, foram priorizados os dados disponíveis no ecoinvent, mas para os casos de indisponibilidade de informações referentes aos processos dos sistemas de produtos estudados, foram utilizadas informações do software GRANTA EduPack.

Os fluxos elementares, ou seja, matéria ou energia do meio ambiente que entram ou saem diretamente do sistema de produto, selecionados para o estudo foram uso de água, energia e produção de CO_2. Essa seleção se deve a disponibilidade de informações do software GRANTA EduPack, de onde foram coletados esses dados. Optou-se por adotar essa como sendo a fonte das informações de fluxos elementares na etapa de produção primária dos materiais.

3.2.3.1 Escova de dente

Em decorrência da falta de informações referentes ao ciclo de vida do bambu no banco de dados “ecoinvent”, a utilização dos dados disponíveis no software GRANTA EduPack requereu a elaboração de uma hipótese referente ao processo de usinagem dos cabos das escovas de dente feitas desse material.

Como é possível observar na Tabela 3, os dados de fluxo de energia e CO_2 (não há informações sobre consumo de água) no processamento do bambu são fornecidos em relação à massa de material removida na fabricação da peça. Portanto, faz-se necessária uma informação de variação de geometria neste processamento.

Tabela 3 – Dados de uso de energia e emissão de CO_2 disponíveis no software GRANTA EduPack

Energia, pegada de cabono e água no processamento	**Mínimo**	**Máximo**	
Energia na usinagem grosseira (por unidade de massa removida)	1,54	1,7	MJ/kg
CO_2 na usinagem grosseira (por unidade de massa removida)	0,115	0,127	kg/kg
Energia na usinagem fina (por unidade de massa removida)	11,1	12,3	MJ/kg
CO_2 na usinagem fina (por unidade de massa removida)	0,832	0,92	kg/kg
Energia no esmirilhamento (por unidade de massa removida)	21,7	24	MJ/kg
CO_2 no esmirilhamento (por unidade de massa removida)	1,63	1,8	kg/kg

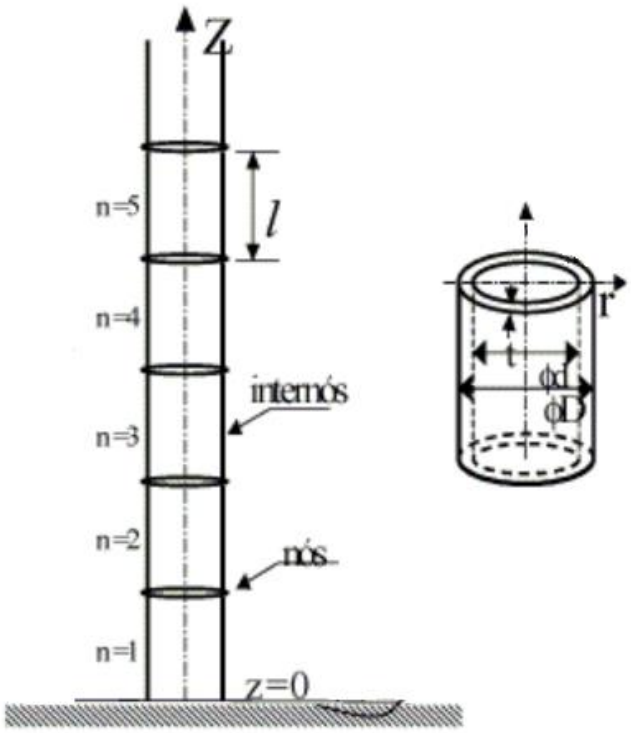
Fonte: Autor “adaptado de” GRANTA EduPack (2020)

O valor da massa removida no processamento do cabo foi calculado através da fórmula 1, onde m é massa, ρ, densidade média do material disponibilizada no software GRANTA EduPack, V_i, volume da peça antes da usinagem estimado a partir de referências bibliográficas e V_f, volume calculado a partir das dimensões coletadas do cabo de bambu da amostra de escova de dente.

$$m = \rho \times (V_i - V_f) \quad (1)$$

Para definição do volume da peça antes da usinagem grosseira, foram utilizados dados coletados a partir da publicação de Ghavamil e Marinho (2005). Deste trabalho, retirou-se as informações de dimensões médias de diâmetro externo (D), espessura de parede (t) e comprimento internodal (l), como representado na Figura 13, com base na espécie de bambu *Guadua angustifólia*, de forma a representar a matéria-prima do cabo de escova de dente estudado.

Figura 13 – Representação gráfica de um colmo de bambu



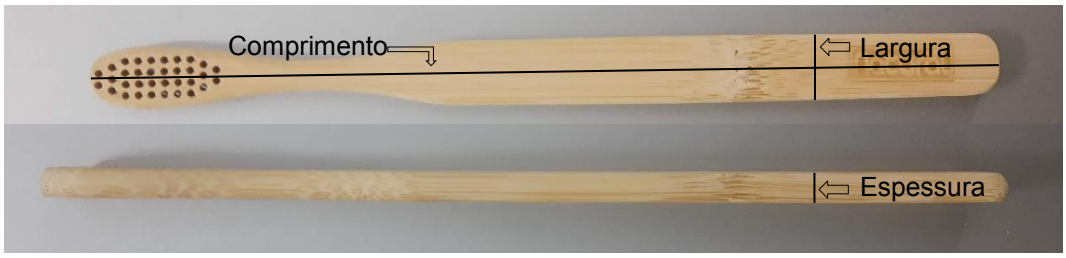
Fonte: Autor “adaptado de” Ghavamil e Marinho, 2005.

A partir desses valores, foram estabelecidas as dimensões de uma placa feita pela planificação de um corte longitudinal ao centro do colmo. Sua altura se mantém igual ao comprimento internodal (l), a profundidade é a mesma da espessura da parede (t) e a largura (L) é dada como a metade do comprimento de circunferência, como demonstrado pela fórmula 2.

$$L = 0{,}5 \times \pi \times D \tag{2}$$

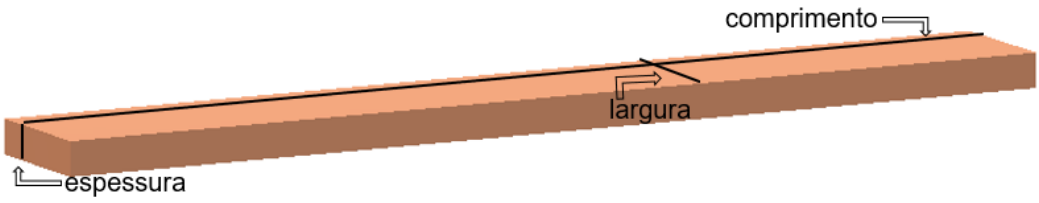
Foram medidos os valores de comprimento, largura e espessura, como indicado na Figura 14, de um exemplar deste produto e a partir destes dados, projetou-se uma placa com essas dimensões, Figura 15, e este foi adotado como referência para calcular o número de cabos possíveis de serem feitos a partir da placa recém dimensionada. A variação do volume deste retângulo para o volume da peça final foi adotada como consequente da usinagem fina do processo de fabricação.

Figura 14 – Indicação das dimensões medidas do cabo de bambu



Fonte: Autor

Figura 15 – Placa projetada com as dimensões medidas do cabo de bambu



Fonte: Autor

3.2.3.2 Cotonete

Por conta da ausência de informações referentes ao processamento de produtos fabricados em papel no software GRANTA EduPack, optou-se por utilizar um processamento já disponível no banco de dados ecoinvent. Escolheu-se o processamento de tubos de papel cartão parar representar o que seria o processo de fabricação das hastes de papel. Com essa consideração, não é necessária a adição de informações quanto aos fluxos elementares estudados neste trabalho, pois essas já estão atreladas ao processo utilizado.

3.2.4 Avaliação de Impactos de Ciclo de Vida (AICV)

Para a fase da avaliação dos impactos ambientais, foi selecionada a metodologia ReCiPe Midpoint (H) e, dentre as categorias de impacto disponíveis, foram escolhidas Mudança Climática e Esgotamento de Água. Apenas essas duas categorias puderam ser calculadas considerando todos os processos contemplados nos sistemas de produtos, por conta da limitação de informações adicionadas nas ICVs. Os processos nos quais os dados foram obtidos a partir do software GRANTA EduPack (com informações apenas dos fluxos de água, energia e CO_2) restringiram a possibilidade do cálculo dos impactos para apenas as citadas categorias.

Os resultados numéricos obtidos no software openLCA, após a realização automatizada dos cálculos de impactos de cada um dos sistemas de produto, foram tabelados em software Microsoft Excel e a partir dessas tabelas, foram traçados gráficos para auxiliar a comparação do desempeno ambiental dos produtos.

3.3 AVALIAÇÃO DO FIM DO CICLO DE VIDA

As discussões relativas à fase final do ciclo de vida dos produtos, a disposição dos materiais após uso, foi feita separadamente da ACV realizada no software openLCA. Para isso, foram analisados os dados disponíveis no software GRANTA EduPack relativos às possíveis destinações dos materiais depois de utilizados e os impactos ambientais atrelados a estas.

Para realização dessa análise, foi levado em consideração os dados de destino dos RSU apresentados na revisão bibliográfica que indicam que apenas uma pequena parcela dos resíduos é destinada à compostagem.

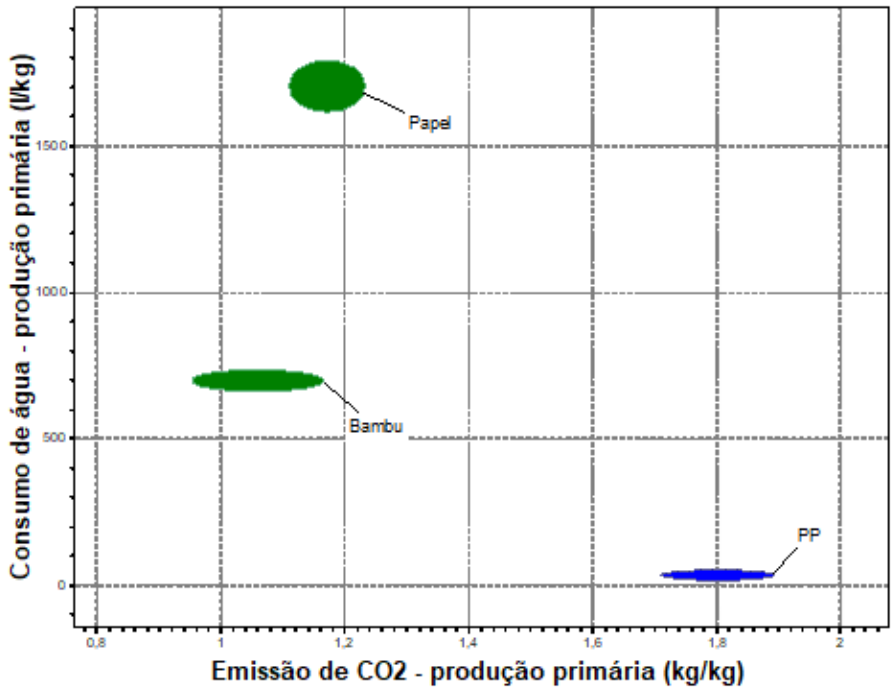
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo serão apresentados os resultados da análise de ciclo de vida dos materiais da haste do cotonete e do cabo de escova de dentes, assim como as cabíveis discussões acerca destes. Inicialmente será apresentada uma análise do desempenho ambiental dos materiais utilizados para os produtos. Em seguida, serão mostrados os cálculos realizados para definição dos dados de entrada do software openLCA, os resultados obtidos através deste e demais considerações referentes a etapa final do ciclo de vida dos materiais.

4.1 ANÁLISE DO DESEMPENHO AMBIENTAL DOS MATERIAIS

Foram levantados dois diagramas utilizando o software GRANTA EduPack com propriedades relativas ao desempenho ambiental e custo, visando uma primeira análise dos materiais PP, papel e bambu utilizados nos produtos estudados (cabo da escova de dente e hastes do cotonete). O primeiro, observado na Figura 16, apresenta o consumo de água em função da emissão de CO_2, ambos relativos à produção primária dos materiais.

Figura 16 – Diagrama de Consumo de água por emissão de CO_2 na produção primária



Fonte: GRANTA EduPack, 2020

Os materiais naturais, papel e bambu, como classificados no software, apresentam melhor desempenho ambiental em relação ao PP, ao analisar a emissão de CO_2. Comparando valores médios desta grandeza, observados na Tabela 4, percebe-se que a opção de material natural do cabo da escova de dente tem impacto 41,31% menor em relação ao polipropileno e, no caso da haste do cotonete, 35%.

Tabela 4 – Dados de emissão de CO2 na produção primária em kg/kg

Material	**Emissão de CO_2 (kg/kg)**		
	Mínimo	**Máximo**	**Média**
PP	1,710	1,890	1,800
Papel	1,110	1,230	1,170
Bambu	0,953	1,160	1,057

Fonte: Autor “adaptado de” GRANTA EduPack, 2020

Quanto ao consumo de água na produção primária destes materiais, os desempenhos ambientais são opostos. O volume médio de água necessário para produção de 1 kg de bambu, apresentado na Tabela 5, chega a superar em 17 vezes o volume para produção da mesma massa de PP. No caso da produção do papel, esse número sobe para 43.

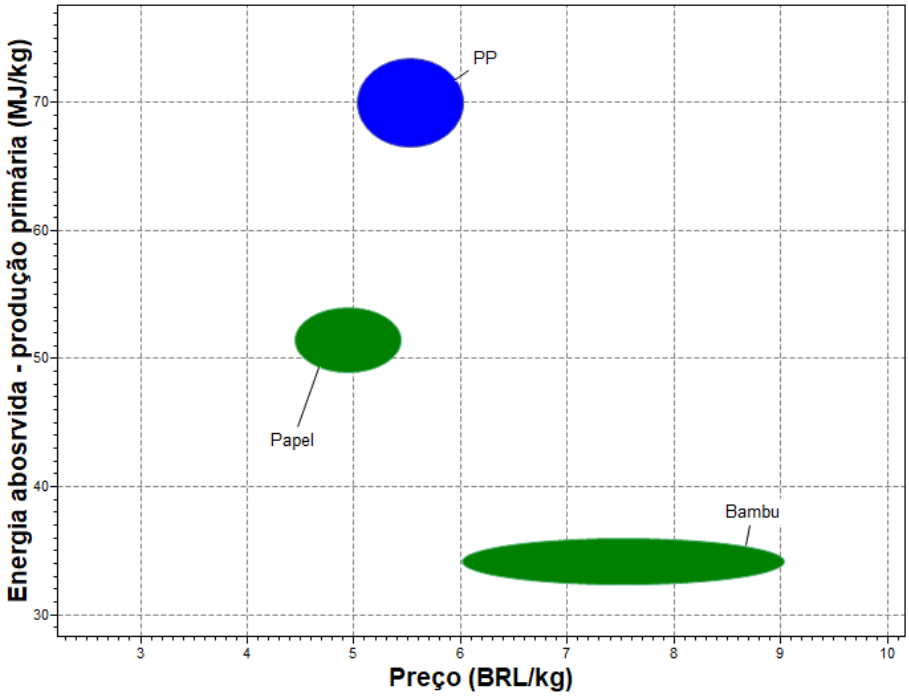
Tabela 5 – Dados de consumo de água na produção primária em l/kg

Material	**Água consumida (l/kg)**		
	Mínimo	**Máximo**	**Média**
PP	37,30	41,20	39,25
Papel	1620	1790	1705
Bambu	665	735	700

Fonte: Autor “adaptado de” GRANTA EduPack, 2020

Referindo-se a energia absorvida na produção primária, observada na Figura 17 e Tabela 6, os materiais naturais se destacam quanto ao desempenho ambiental, tendo valores inferiores ao PP em 26,43% e 51,14%, para o papel e bambu respectivamente.

Figura 17 – Diagrama de Energia absorvida na produção primária por preço



Fonte: GRANTA EduPack, 2020

Tabela 6 – Dados de energia absorvida na produção primária em MJ/kg

Material	Energia absorvida (MJ/kg)		
	Mínimo	Máximo	Média
PP	66,6	73,4	70
Papel	49	54	51,5
Bambu	32,5	35,9	34,2

Fonte: Autor “adaptado de” GRANTA EduPack, 2020

Analisando a Figura 17, também é possível analisar os custos relativos aos materiais. Inicialmente, observa-se o PP como uma opção mais vantajosa financeiramente para a produção das escovas de dentes, mas para os cotonetes, ambos os materiais apresentam valores médios aproximados. Por essa grandeza não ser avaliada na ACV, optou-se por calcular o preço correspondente ao fluxo de referência estabelecido, para melhor comparação entre os produtos.

A Tabela 7 apresenta valores médios de preço em reais por quilograma de 10.000 produtos. Observa-se que para ambos os produtos a opção em PP é mais econômica, quando considerado exclusivamente o custo do material. Cabe a ressalva de que há mais fatores financeiros relativos à escolha dos materiais, como os tipos de processamento a serem empregados e os custos destes.

Tabela 7 – Valores médios de preço em reais por quilograma de 10.000 produtos

Produto	**Material**	**Preço médio (BRL/kg)**	**Preço (BRL) p/ 10.000 produtos**
Escova	PP	5,52	586,91
	Bambu	7,52	662,82
Cotonete	PP	5,52	9,66
	Papel	4,94	14,81

Fonte: Autor “adaptado de” GRANTA EduPack, 2020

4.2 AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA

Nesta seção serão apresentados os sistemas de produtos definidos, os ICVs construídos no software openLCA, os resultados de ACV obtidos a partir deste e as cabíveis discussões a respeito.

4.2.1 Inventários de ciclo de vida

Os ICVs dos produtos estudados foram tabelados de acordo com os fluxos de entrada e saída indicados nos sistemas de produto, que podem ser observados nas figuras de 9 a 12. Tabela 8, Tabela 11, Tabela 12 e Tabela 13 apresentam os ICVs relativos aos produtos escova de dente com cabo de PP, escova de dente com cabo de bambu, cotonete com haste de PP e cotonete com haste de papel, respectivamente.

Os valores apresentados nestas tabelas foram utilizados como dados de entrada no software openLCA para o desenvolvimento das ACVs. Foram calculados considerando os valores de massa média, apresentados na Tabela 1, relativa a um único produto. Para que as avaliações fossem realizadas conforme fluxo de

referência previamente estabelecido, foi definida a referência em software de 10.000 itens, no momento do cálculo dos impactos ambientais.

Tabela 8 – ICV do produto escova de dente com cabo de PP

Produção do PP granulado				
Parâmetros	**Quantidade**	**Unidade**	**Provedor**	**Fonte bibliográfica**
ENTRADAS				
Água	0,41732	l	Fluxo elementar	Calculado a partir de GRANTA EduPack 2020
Energia	0,74427	MJ	Fluxo elementar	Calculado a partir de GRANTA EduPack 2020
SAÍDAS				
PP granulado	1	item	-	-
CO_2	0,019138	kg	Fluxo elementar	Calculado a partir de GRANTA EduPack 2020

Transporte do PP				
Parâmetros	**Quantidade**	**Unidade**	**Provedor**	**Fonte bibliográfica**
ENTRADAS				
PP granulado	1	item	Produção do PP granulado	-
Transporte	1,5948	kg*km	Frete em caminhão	ecoinvent
SAÍDAS				
PP trasportado	1	item	-	-

Injeção do cabo				
Parâmetros	**Quantidade**	**Unidade**	**Provedor**	**Fonte bibliográfica**
ENTRADAS				
PP transportado	1	item	Transporte do PP	-
Água	0,17703	l	Fluxo elementar	Calculado a partir de GRANTA EduPack 2020
Energia	0,2286	MJ	Fluxo elementar	Calculado a partir de GRANTA EduPack 2020
SAÍDAS				
Cabo injetado	1	item	-	-
CO_2	0,01712	kg	Fluxo elementar	Calculado a partir de GRANTA EduPack 2020

Transporte do cabo				
Parâmetros	**Quantidade**	**Unidade**	**Provedor**	**Fonte bibliográfica**
ENTRADAS				
Cabo injetado	1	item	Injeção do cabo	-
Transporte	1,5948	kg*km	Frete em caminhão	ecoinvent
SAÍDAS				
Cabo trasportado	1	item	-	-

Fonte: Autor

Como citado no capítulo da Metodologia, foi necessária a realização de uma hipótese referente ao processo de usinagem do cabo da escova de dente feita de bambu. A partir do trabalho de Ghavami e Marinho (2005), foram coletados valores médios das dimensões da região entre os nós do bambu, como segue:

- Diâmetro externo (D): 79,56 mm
- Espessura de parede (t): 10,31 mm
- Comprimento internodal (l): 237,5 mm

Considerando o processo de planificação do corte longitudinal da região internós, tem-se a largura L de 124,97 mm, corresponde à metade do comprimento de circunferência. Com isso, obtém-se uma placa de dimensões 237,5 mm X 124,97 mm X 10,31 mm, a partir da qual serão usinados os cabos das escovas.

A partir do exemplar da escova de dente adquirida, foram medidas suas dimensões, calculado seu volume, como segue:

- Comprimento: 180 mm
- Largura: 13 mm
- Espessura: 6 mm
- Volume: $1{,}4.10^{-5}$ m³

A tabela 8 apresenta de modo correlacionado, quais dados foram obtidos a partir do cálculo do número de cabos possíveis de serem usinados a partir da placa de bambu estudada. Nela são apresentados os elementos utilizados e suas unidades métricas, bem como as direções 1, 2 e 3 (respectivamente comprimento, largura e profundidade) da peça em estudo.

Como observado na Tabela 9, foi calculada a razão entre as dimensões da placa e as dimensões da escova e a partir desse valor, foi definido o maior número inteiro menor do que essa razão. Ao realizar a multiplicação entre os três números inteiros obtidos (1, 9 e 1) encontra-se uma produtividade máxima de 9 cabos.

Tabela 9 – Cálculo do número de cabos possíveis de serem usinados a partir da placa de bambu

Elemento	**Direção 1**	**Direção 2**	**Direção 3**
Placa (mm)	237,5	124,97	10,31
Cabo (mm)	180	13	6
Razão	1,32	9,61	1,72
Inteiro	1	9	1

Fonte: Autor

Foram calculadas as dimensões, apresentadas na Tabela 10, dos paralelepípedos resultantes dos cortes hipoteticamente realizados na placa. As peças resultantes apresentam volume de $1{,}53.10^{-5}$ m³. Utilizando a fórmula 1, os

valores de densidade média 700 kg/m³, obtido pelo software GRANTA EduPack, e os volumes calculados, encontra-se a variação de massa atribuída ao processo de usinagem grosseiro, tendo essa o valor de $1{,}397.10^{-2}$ kg.

Tabela 10 – Dimensões em milímetros dos paralelepípedos resultantes da divisão da placa em 20 partes

Elemento	Direção 1	Direção 2	Direção 3
Placa (mm)	237,5	124,97	10,31
Inteiro	2	10	1
Paralelepípedo (mm)	118,75	12,50	10,31

Fonte: Autor

A massa removida no processo de usinagem fina foi atribuída como sendo a variação entre a massa calculada da peça de dimensões 180 mm X 13 mm x 6 mm, ou seja, $9{,}828*10^{-3}$ kg, e a massa média pesada a partir dos exemplares do cabo de escova de dente. Com isso, tem-se o valor de $1{,}008.10^{-3}$ kg.

Por fim, os valores de massa encontrados como resultantes da usinagem fina e grossa foram utilizados para cálculo dos fluxos de energia e CO_2 associados ao processamento do cabo.

Na Tabela 11 é possível observar os resultados obtidos, assim como os demais valores relativos ao ICV do referido produto.

Tabela 11 – ICV do produto escova de dente com cabo de bambu

Produção do bambu				
Parâmetros	**Quantidade**	**Unidade**	**Provedor**	**Fonte bibliográfica**
ENTRADAS				
Água	6,174	l	-	Calculado a partir de GRANTA EduPack 2020
Energia	0,30164	MJ	Fluxo elementar	Calculado a partir de GRANTA EduPack 2020
SAÍDAS				
Bambu produzido	1	item	-	-
CO_2	0,0093183	kg	Fluxo elementar	Calculado a partir de GRANTA EduPack 2020

Transporte do Bambu				
Parâmetros	**Quantidade**	**Unidade**	**Provedor**	**Fonte bibliográfica**
ENTRADAS				
Bambu produzido	1	item	Produção do bambu	-
Transporte	3,5712	kg*km	Frete em caminhão	ecoinvent
SAÍDAS				
Bambu trasportado	1	item	-	-

Usinagem do cabo				
Parâmetros	**Quantidade**	**Unidade**	**Provedor**	**Fonte bibliográfica**
ENTRADAS				
Bambu trasportado	1	item	Transporte do bambu	-
Energia	0,034441	MJ	Fluxo elementar	Calculado a partir de GRANTA EduPack 2020 e Ghavamil e Marinho (2005)
SAÍDAS				
Cabo usinado	1	item	-	-
CO_2	0,0025746	kg	Fluxo elementar	Calculado a partir de GRANTA EduPack 2020 e Ghavamil e Marinho (2005)

Transporte do cabo				
Parâmetros	**Quantidade**	**Unidade**	**Provedor**	**Fonte bibliográfica**
ENTRADAS				
Cabo usinado	1	item	Usinagem do cabo	-
Transporte	1,323	kg*km	Frete em caminhão	ecoinvent
SAÍDAS				
Cabo trasportado	1	item	-	-

Fonte: Autor

Na Tabela 12 está apresentada a ICV referente ao sistema de produto cotonete com haste de PP.

Tabela 12 – ICV do produto cotonete com haste de PP

Produção do PP granulado				
Parâmetros	**Quantidade**	**Unidade**	**Provedor**	**Fonte bibliográfica**
ENTRADAS				
Água	0,0068687	l	Fluxo elementar	Calculado a partir de GRANTA EduPack 2020
Energia	0,01225	MJ	Fluxo elementar	Calculado a partir de GRANTA EduPack 2020
SAÍDAS				
PP granulado	1	item	-	-
CO_2	0,000315	kg	Fluxo elementar	Calculado a partir de GRANTA EduPack 2020

Transporte do PP				
Parâmetros	**Quantidade**	**Unidade**	**Provedor**	**Fonte bibliográfica**
ENTRADAS				
PP granulado	1	item	Produção do PP granulado	-
Transporte	0,02625	kg*km	Frete em caminhão	ecoinvent
SAÍDAS				
PP trasportado	1	item	-	-

Extrusão da haste				
Parâmetros	**Quantidade**	**Unidade**	**Provedor**	**Fonte bibliográfica**
ENTRADAS				
PP transportado	1	item	Transporte do PP	-
SAÍDAS				
Haste extrudada	1	item	-	-

Transporte da haste				
Parâmetros	**Quantidade**	**Unidade**	**Provedor**	**Fonte bibliográfica**
ENTRADAS				
Haste extrudada	1	item	Extrusão da haste	-
Transporte	0,0265	kg*km	Frete em caminhão	ecoinvent
SAÍDAS				
Haste trasportada	1	item	-	-

Fonte: Autor

O inventário exposto na Tabela 13 corresponde ao sistema de produto cotonete com haste de papel.

Tabela 13 – ICV do produto cotonete com haste de papel

Produção do papel				
Parâmetros	**Quantidade**	**Unidade**	**Provedor**	**Fonte bibliográfica**
ENTRADAS				
Água	0,5115	l	Fluxo elementar	Calculado a partir de GRANTA EduPack 2020
Energia	0,01545	MJ	Fluxo elementar	Calculado a partir de GRANTA EduPack 2020
SAÍDAS				
Papel produzido	1	item	-	-
CO_2	0,000351	kg	Fluxo elementar	Calculado a partir de GRANTA EduPack 2020

Transporte do papel				
Parâmetros	**Quantidade**	**Unidade**	**Provedor**	**Fonte bibliográfica**
ENTRADAS				
Papel produzido	1	item	Produção do papel	-
Transporte	0,09	kg*km	Frete em caminhão	ecoinvent
SAÍDAS				
Papel trasportado	1	item	-	-

Processamento da haste				
Parâmetros	**Quantidade**	**Unidade**	**Provedor**	**Fonte bibliográfica**
ENTRADAS				
Papel transportado	1	item	Transporte do papel	-
SAÍDAS				
Haste processada	1	item	-	-

Transporte da haste				
Parâmetros	**Quantidade**	**Unidade**	**Provedor**	**Fonte bibliográfica**
ENTRADAS				
Haste processada	1	item	Extrusão da haste	-
Transporte	0,0265	kg*km	Frete em caminhão	ecoinvent
SAÍDAS				
Haste trasportada	1	item	-	-

Fonte: Autor

4.2.2 Avaliação de Impactos de Ciclo de Vida (AICV)

A utilização do software openLCA e do método AICV “ReCiPe Midpoint (H)”, disponível no banco de dados “ecoinvent 3.7 LCIA methods” permitiu que os cálculos dos impactos fossem feitos de forma automática. A partir da elaboração dos sistemas de produtos e inserção dos valores apresentados nos ICVs no software, foi possível obter estes resultados.

A partir dos resultados colhidos no openLCA, foram elaboradas tabelas e gráficos a fim de permitir melhor análise dos dados e a comparação entre os produtos.

4.2.2.1 Escova de dente

A Tabela 14 apresenta o impacto na mudança climática (considerando que a mudança climática nesse contexto é quantificada pela massa de CO_2 equivalente emitida) gerado pelo ciclo de vida do cabo de 10.000 escovas de dente. Ao analisá-la, é possível observar que, dentre os processos estudados e considerando a categoria de impacto “Mudança Climática”, a produção do material PP granulado é a etapa mais crítica no seu ciclo de vida, representando cerca 68% de toda massa de CO_2 equivalente. A etapa de processamento do cabo também tem um valor significativo se comparada com os transportes estudados, tendo um impacto quase 40 vezes superior.

Analisando os dados apresentados referente ao material bambu, é possível perceber que para a categoria de Mudança Climática, a etapa de produção primária do material base também é a mais crítica, representando aproximadamente 85% das emissões de CO_2 equivalente.

Tabela 14 – Impacto na Mudança Climática gerado pelo ciclo de vida do cabo de 10.000 escovas de dente

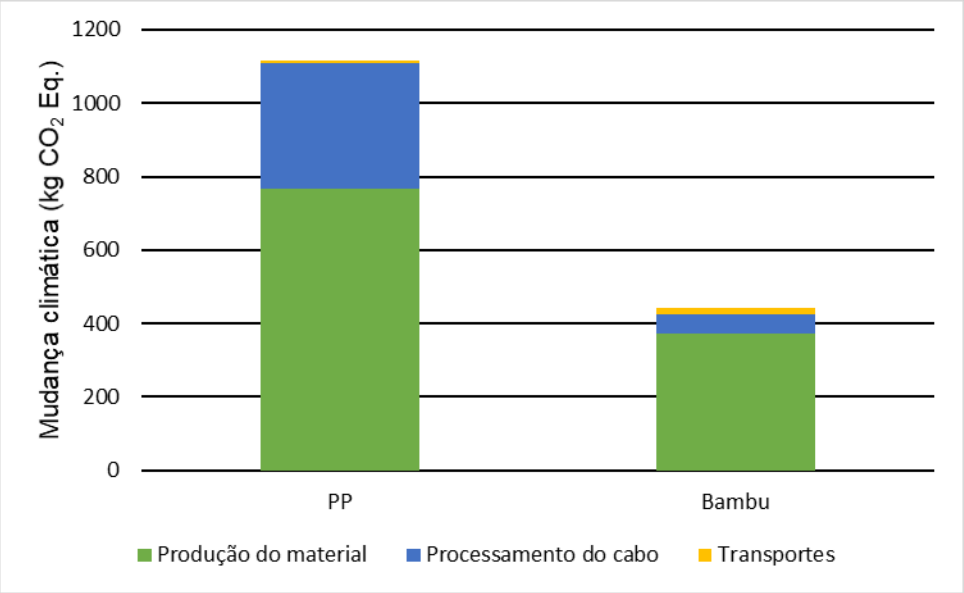
Material	Processo	Mudança climática (kg CO_2 Eq.)	Percentual (%)
PP	Produção do material	765,50	68,54
	Processamento do cabo	342,40	30,66
	Transportes	8,92	0,80
	Total	1116,82	100,0
Bambu	Produção do material	372,70	84,51
	Processamento do cabo	51,49	11,68
	Transportes	16,83	3,82
	Total	441,02	100,0

Fonte: Autor “adaptado de” openLCA

A Figura 18 apresenta uma comparação do impacto gerado na mudança climática para os dois materiais componentes das escovas de dente. Pode ser observado um destaque no desempenho ambiental do bambu na categoria de

impacto Mudança Climática. A emissão em quilogramas de CO_2 equivalente de todos os processos considerados no seu ciclo de vida estudado representa apenas 39,5% do valor dessa mesma grandeza para a escova com cabo de polipropileno.

Figura 18 – Gráfico de comparação entre o impacto gerado na Mudança climática, em kg CO_2 Eq., dos diferentes materiais utilizados em cabos de escovas de dente



Fonte: Autor “adaptado de” openLCA

A Tabela 15 apresenta o impacto no Esgotamento de água gerado pelo ciclo de vida do cabo de 10.000 escovas de dente. Considerando os resultados apresentados, nota-se que a etapa crítica do sistema de produto do PP também é a de produção do material granulado, representando cerca de 60% do volume de água consumido. Com relação ao sistema de produto do cabo de bambu, observa-se uma expressiva criticidade na produção primária do material, com consumo de água que representa cerca de 95% do volume total.

Tabela 15 – Impacto no Esgotamento de água gerado pelo ciclo de vida do cabo de 10.000 escovas de dente

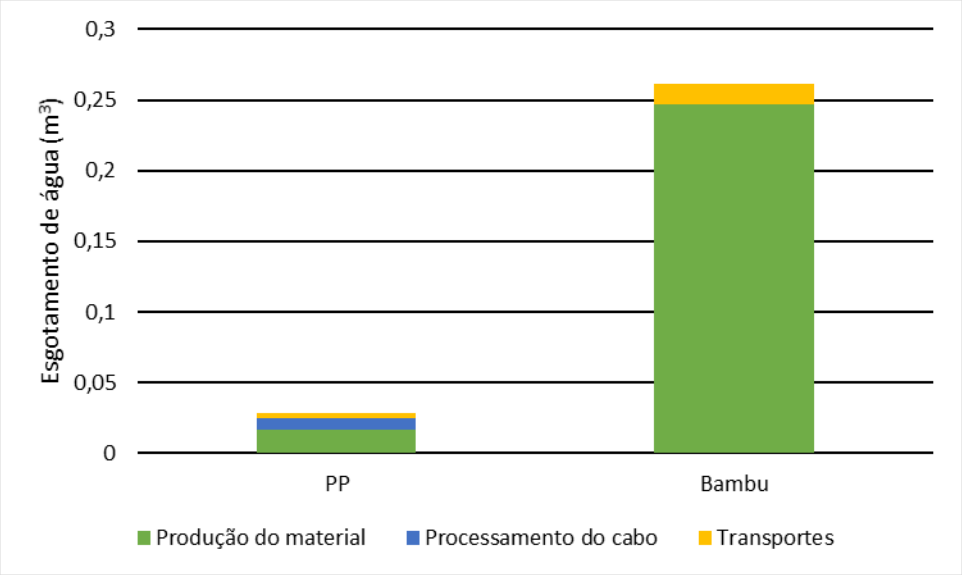
Material	Processo	Esgotamento de água (m³)	Percentual (%)
PP	Produção do material	0,0170	60,33
	Processamento do cabo	0,0076	27,10
	Transportes	0,0035	12,57
	Total	0,0282	100,0
Bambu	Produção do material	0,247	94,64
	Transportes	0,014	5,36
	Total	0,261	100,0

Fonte: Autor “adaptado de” openLCA

Para realização da análise do impacto gerado no Esgotamento de Água pelo ciclo de vida dos cabos de bambu das escovas de dente, cabe a ressalva de que não foram encontradas informações referentes ao consumo de água no processo de usinagem destes cabos.

A Figura 19 apresenta um gráfico de comparação entre o impacto gerado no esgotamento de água, em m³, dos diferentes materiais utilizados em cabos de escovas de dente. Ao compará-los, a criticidade relativa à produção primária do bambu é ainda mais evidente. O volume de água demandado apenas nesse processo chega a superar em quase 9 vezes o volume consumido em todo ciclo de vida analisado da opção de cabo polimérico.

Figura 19 – Gráfico de comparação entre o impacto gerado no Esgotamento de água, em m³, dos diferentes materiais utilizados em cabos de escovas de dente



Fonte: Autor “adaptado de” openLCA

4.2.2.2 Cotonetes

A Tabela 16 apresenta o impacto na mudança climática gerado pelo ciclo de vida da haste de 10.000 cotonetes. Realizando a análise dos impactos relativos ao sistema de produto das hastes de PP, nota-se significativa emissão de CO_2 equivalente na etapa de extrusão da haste, representando aproximadamente 99,9% das emissões realizadas em na totalidade dos processos estudados. Em relação às emissões geradas nas etapas de transporte, a produção primária do PP pode ser considerada como uma etapa crítica, sendo responsável por um impacto cerca de 89 vezes maior.

Analisando os dados referentes ao sistema de produto da haste de papel, nota-se expressiva influência da etapa de processamento da haste, sendo responsável pela emissão de 99,92% da massa de CO_2 equivalente no ciclo de vida estudado. Por isso, as etapas de produção do material e de transporte tem mínima significância nessas considerações.

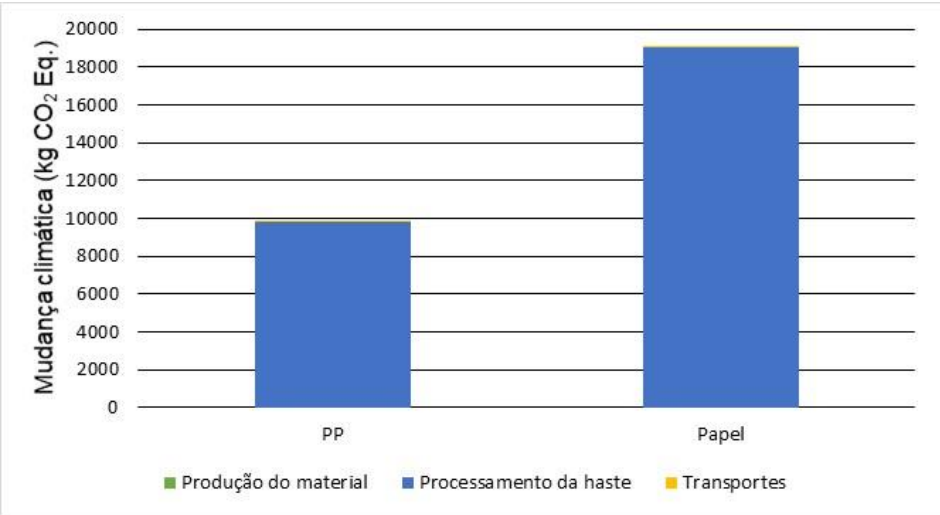
Tabela 16 – Impacto na Mudança Climática gerado pelo ciclo de vida da haste de 10.000 cotonetes

Material	Processo	Mudança climática (kg CO_2 Eq.)	Percentual (%)
PP	Produção do material	12,60	0,13
	Processamento do cabo	0,00	0,00
	Transportes	0,00	0,00
	Total	12,60	0,1
Papel	Produção do material	14,04	0,07
	Processamento do cabo	19020,00	99,92
	Transportes	0,49	0,00
	Total	19034,53	100,0

Fonte: Autor “adaptado de” openLCA

A Figura 20 apresenta o gráfico de comparação entre o impacto gerado na mudança climática, em kg CO_2 Eq., dos diferentes materiais utilizados em hastes de cotonete. Ao comparar os impactos totais do ciclo de vida estudado de cada um dos materiais, nota-se que no caso do papel, seus processos são responsáveis pela emissão de aproximadamente o dobro das emissões de CO_2 equivalente dos processos relativos à haste de PP.

Figura 20 – Gráfico de comparação entre o impacto gerado na Mudança climática, em kg CO_2 Eq., dos diferentes materiais utilizados em hastes de cotonete



Fonte: Autor “adaptado de” openLCA

A Tabela 17 apresenta os impactos no Esgotamento de água gerados pelo ciclo de vida da haste de PP de 10.000 cotonetes, apresentado. Quanto ao sistema de produto de PP, a etapa de extrusão da haste representa o consumo majoritário no ciclo de vida estudado, equivalendo ao volume absoluto quando realizado os arredondamentos numéricos. Quando comparados, os volumes de água consumidos nas etapas de transporte e produção primária do PP granulado são desprezíveis.

Tratando-se do sistema de produto dos cotonetes com hastes de papel, o cenário se assemelha, tendo também a etapa de processamento da haste como responsável por 100% do volume de água dado arredondamentos numéricos. Com relação à etapa de produção primária do papel, esta é responsável por cerca de 46 vezes o volume consumido para realização dos transportes.

Tabela 17 – Impacto no Esgotamento de água gerado pelo ciclo de vida da haste de 10.000 cotonetes

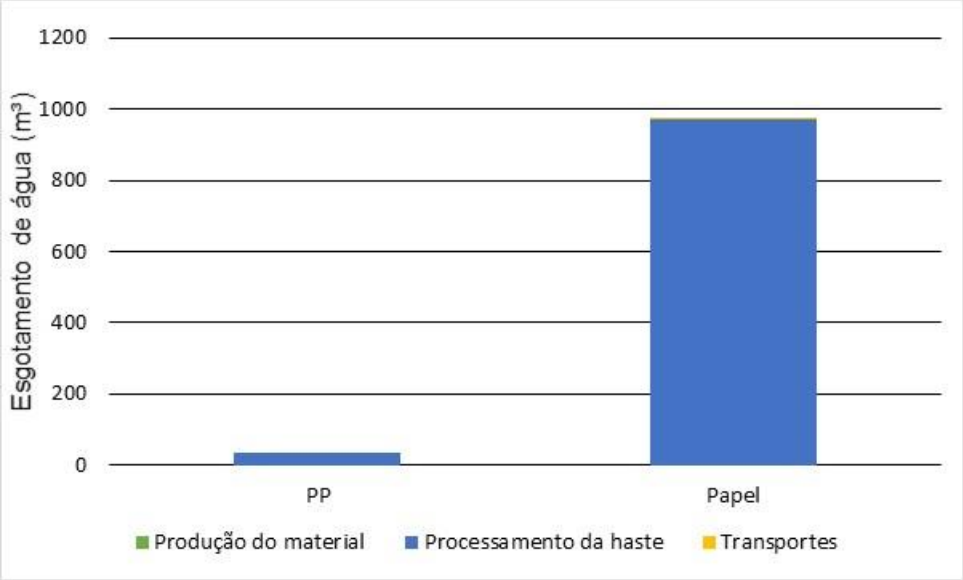
Material	**Processo**	**Esgotamento de água (m^3)**	**Percentual (%)**
PP	Produção do material	12,60	36,94
	Processamento do cabo	0,00	0,00
	Transportes	0,00	0,00
	Total	12,60	36,9
Papel	Produção do material	14,04	0,07
	Processamento do cabo	19020,00	99,92
	Transportes	0,49	0,00
	Total	19034,53	100,0

Fonte: Autor “adaptado de” openLCA

Realizando a comparação dos dois materiais, através da análise da Figura 21 que apresenta um gráfico de comparação entre o impacto gerado no Esgotamento de água, em m^3, dos diferentes materiais utilizados em hastes de cotonetes, nota-se expressiva criticidade no ciclo de vida dos cotonetes com hastes

de papel, sendo necessário o consumo de cerca de 28 vezes o volume de água demandado no ciclo de vida da opção polimérica.

Figura 21 – Gráfico de comparação entre o impacto gerado no Esgotamento de água, em m³, dos diferentes materiais utilizados em hastes de cotonetes



Fonte: Autor “adaptado de” openLCA

4.3 AVALIAÇÃO DO FIM DO CICLO DE VIDA

Nesta seção serão discutidos aspectos relativos à etapa final do ciclo de vida dos produtos, apresentando as possíveis destinações após o uso dos materiais estudados.

4.3.1 Escovas de dente

A Tabela 18 apresenta os dados relativos à etapa de disposição final dos materiais PP e Bambu. Como é possível observar, ambos os materiais estudados no presente trabalho utilizados na fabricação do cabo das escovas de dente podem ser destinados a aterros de forma segura. Apenas o bambu é considerado como biodegradável, entretanto, em condições anaeróbicas em que os materiais

comumente são submetidos nos aterros, essa propriedade não apresenta relevância.

Tabela 18 – Dados relativos à etapa de disposição final dos materiais PP e Bambu

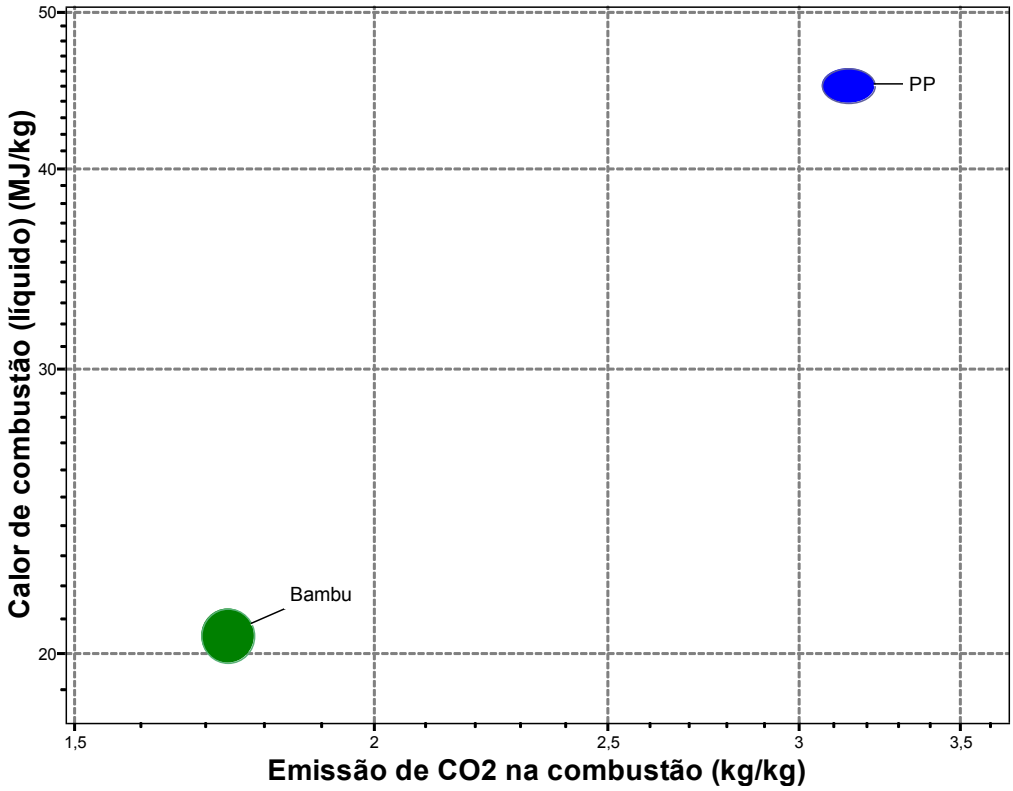
Propriedade	**PP**	**Bambu**	**Papel**
Reciclável	Sim	Não	Sim
Energia absorvida na reciclagem (MJ/kg)	25,9	-	22,1
Pegada de carbono (kg/kg)	1,115	-	1,19
Downcycle	Sim	Sim	Sim
Combustão para recuperação de energia	Sim	Sim	Sim
Calor de combustão (líquido) (MJ/kg)	45,1	20,55	19,7
Emissão de CO_2 na combustão (kg/kg)	3,14	1,735	1,465
Aterro	Sim	Sim	Sim
Biodegradável	Não	Sim	Sim

Fonte: Autor “adaptado de” GRANTA EduPack 2020

Tanto PP quanto bambu podem passar pelo processo de *downcyle*, portanto são capazes de gerar materiais de propriedades inferiores, mas apenas o PP é considerado como capaz de ser reprocessado, resultando em um material de propriedades próximas à condição inicial, portanto, reciclável.

A Figura 22 apresenta o diagrama de calor de combustão (líquido) por emissão de CO_2 na combustão dos materiais PP e Bambu. Os dois materiais podem ser submetidos à combustão para recuperação de energia térmica, mas como observado no diagrama, a emissão de CO_2 na combustão do PP é aproximadamente 80% maior do que para o bambu. Por outro lado, a queima de 1 kg de PP é capaz de liberar 119% a mais de energia do que o bambu.

Figura 22 – Diagrama de calor de combustão (líquido) por emissão de CO_2 na combustão dos materiais PP e Bambu



Fonte: GRANTA EduPack 2020

4.3.2 Cotonetes

A Tabela 19 apresenta os dados relativos à etapa de disposição final dos materiais PP e Papel. Quanto aos materiais utilizados na fabricação das hastes de cotonete, eles se diferem em relação a biodegradabilidade, como observado na tabela, pois apenas o papel é considerado como biodegradável. Ambos são passíveis de serem submetidos ao processo de *downcycle* e a combustão para recuperação de energia, são considerados como recicláveis e seguros de serem descartados em aterros.

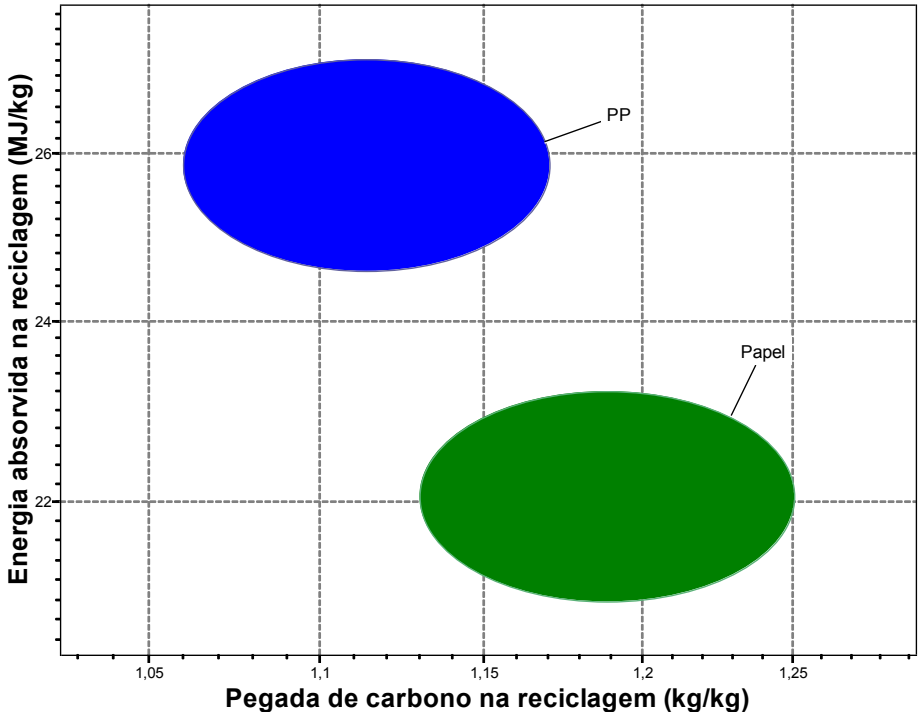
Tabela 19 – Dados relativos à etapa de disposição final dos materiais PP e Papel

Propriedade	**PP**	**Papel**
Reciclável	Sim	Sim
Energia absorvida na reciclagem (MJ/kg)	25,9	22,1
Pegada de carbono (kg/kg)	1,115	1,19
Downcycle	Sim	Sim
Comustão para recuperação de energia	Sim	Sim
Calor de combustão (líquido) (MJ/kg)	45,1	19,7
Emissão de CO_2 na combustão (kg/kg)	3,14	1,465
Aterro	Sim	Sim
Biodegradável	Não	Sim

Fonte: Autor “adaptado de” GRANTA EduPack 2020

A Figura 23 apresenta um diagrama de energia absorvida por emissão de CO_2 na reciclagem dos materiais PP e Papel. Embora ambos os materiais sejam recicláveis, nota-se na figura que há impactos ambientais relativos a esse processo. Para realização da reciclagem do PP, é requerida, em média, 17% a mais de energia do que para reciclagem do papel. Por outro lado, tem-se uma emissão de CO_2 6% menor.

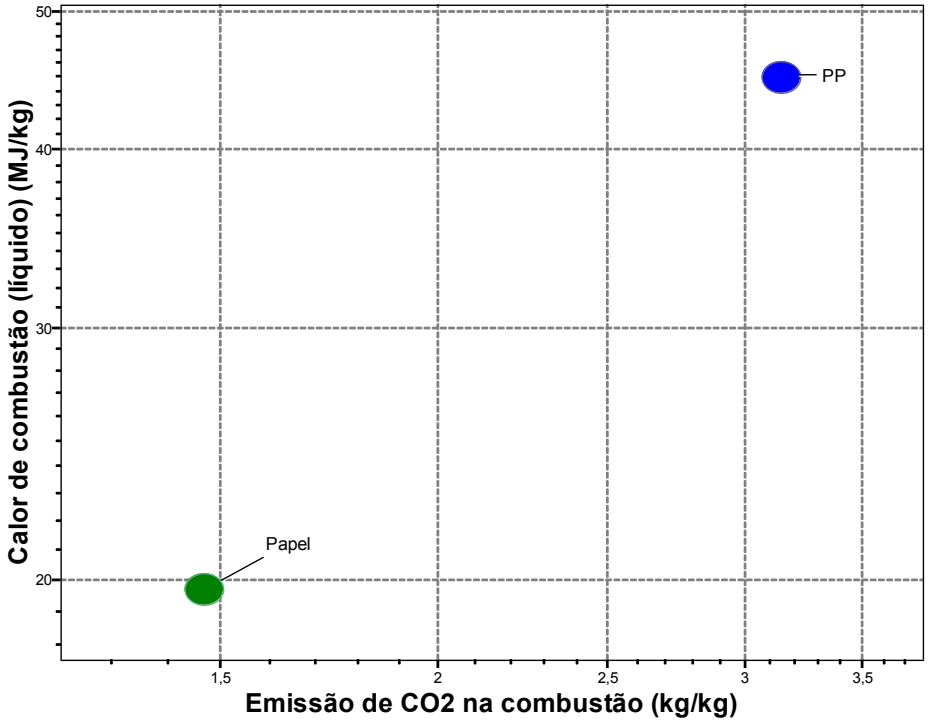
Figura 23 – Diagrama de energia absorvida na reciclagem por emissão de CO_2 na reciclagem dos materiais PP e Papel



Fonte: GRANTA EduPack 2020

Conforme diagrama de calor de combustão (líquido) por emissão de CO_2 na combustão dos materiais PP e Papel observado na Figura 24, nota-se um maior rendimento na combustão do PP para obtenção de energia, tendo em média 129% a mais de energia liberada para mesma massa de papel queimado. Entretanto, a emissão de CO_2 relativa à combustão do papel corresponde a cerca de 47% da emissão de CO_2 consequente da queima do PP.

Figura 24 – Diagrama de calor de combustão (líquido) por emissão de CO_2 na combustão dos materiais PP e Papel



Fonte: GRANTA EduPack 2020

4.4 ANÁLISE CRÍTICA DOS RESULTADOS

Quanto aos resultados obtidos na seção de análise do desempenho ambiental dos materiais a partir do software GRANTA EduPack, estes foram analisados em função de uma unidade de massa, portanto não são totalmente conclusivos para comparação do desempenho ambiental dos produtos, pois para isso é necessário que as grandezas estejam relacionadas a mesma unidade funcional. Entretanto, é cabível uma discussão quanto aos materiais propriamente ditos.

Em relação à emissão de CO_2, o bambu e o papel geram menor impacto em relação ao PP, com valores 41% e 35% menores, respectivamente. Os valores de energia absorvida destes materiais classificados como naturais também são inferiores ao do PP. No consumo de água a situação se inverte e o polímero

demanda volumes significativamente menores. Quanto ao preço, o PP se destaca em relação aos custos dos demais materiais.

Como os produtos comparados neste trabalho tem massas relativamente próximas (cabo de PP de 10,6 g, cerca de 20% a mais do que o cabo de bambu de 8,82 g; haste de PP de 0,175 g, cerca de 42% menor do que a haste de papel de 0,3 g), pode-se esperar que os resultados obtidos em ACV sejam semelhantes ao discutidos acima.

Considerando a ACV do sistema de produto da escova de dente com cabo de PP, tanto para categoria de impacto Mudança Climática quanto para o Esgotamento de Água, a etapa de produção primária do polímero foi a mais crítica, sendo responsável por 69% e 60%, respectivamente da totalidade dessas grandezas.

Pela análise da ACV do produto de cabo de bambu, nota-se que também é a etapa de produção primária do material a mais crítica, apresentando valores de 85% e 95% dos impactos gerados em Mudança Climática e Esgotamento de Água, respectivamente.

Comparando os resultados de ACV dos dois sistemas de produto, vê-se que o ciclo de vida do bambu tem desempenho ambiental superior na categoria Mudança Climática, gerando impacto 40% menor do que a opção do polímero sintético. Quanto a categoria Esgotamento de Água, o PP se sobressai, consumindo um volume de água quase 9 vezes menor.

Com isso entende-se que o PP possa ser uma melhor opção para fabricação dos cabos das escovas de dente, pois é mais significativa, em proporção, a sua economia no consumo de água do que a menor emissão de CO_2 do bambu.

Analisando os resultados de ACV do ciclo de vida do cotonete com haste de PP, nota-se que a etapa de extrusão da haste é a mais crítica, sendo responsável por quase 100% da emissão de CO_2 equivalente e consumo de água.

Para a opção do produto em papel, a etapa de processamento da haste também foi a responsável por quase 100% da totalidade dos impactos gerados no ciclo de vida do cotonete.

Realizando a comparação entre os dois produtos, o desempenho ambiental da opção em papel é inferior para as duas categorias de impacto estudadas. Portanto, entende-se o PP como sendo uma melhor opção de material a ser utilizado na fabricação de cotonetes.

Os valores obtidos tanto no processamento da extrusão da haste de PP quanto no processamento da haste de papel, para ambas as categorias de impacto, são muito discrepantes em relação aos demais valores observados. Acredita-se que essa diferença se deve à fonte de dados utilizada para essas etapas de ciclo de vida. Devida a ausência de dados de processamento do papel no software GRANTA EduPack, foram utilizados processos disponíveis no ecoinvent.

Os dados de processamento extraídos do GRANTA EduPack se limitam a três grandezas: consumo de água, energia absorvida e emissão de CO_2. Já no ecoinvent, há diversos fluxos além desses atrelados aos processos (como a emissão de outros gases, por exemplo). Esses dados devem ser utilizados para a realização dos cálculos de impacto das categorias avaliadas, o que, por consequência, resultou em valores mais expressivos para as etapas de processamento das hastes do que as demais etapas.

Entende-se que a discrepância entre os impactos ambientais gerados no processo de injeção dos cabos e extrusão das hastes também deve ser decorrente da diferença entre as informações disponíveis nos bancos de dados utilizados como fonte para cada processo.

Analisando os resultados apresentados na seção de avaliação da etapa final do ciclo de vida, entende-se que o PP é uma melhor opção em relação ao bambu para finalidade de fabricação dos cabos de escova de dente. O material natural não é reciclável e, apesar de ser biodegradável, não é coerente a consideração desta propriedade dado que os RSU são majoritariamente descartados em locais que não apresentam as condições biológicas necessárias para promoção da biodegradabilidade.

Em relação a opção de destino combustão, a queima do PP é capaz de liberar 119% a mais de energia do que a queima do bambu, mas com emissão de 80% a mais de CO_2 equivalente. Considerando proporção numérica, o PP se sobressai nesta destinação.

Para análise dos materiais utilizados na haste do cotonete, cabe a comparação entre os valores relativos aos processos de combustão e reciclagem, já que a biodegradabilidade exclusiva do papel, nesse caso, não será considerada. Para a reciclagem do PP, é demandado 17% a mais em energia, mas com emissão de CO_2 6% inferior a esse processo no papel.

No processo de combustão do papel, tem-se uma emissão de 53% a menos de CO_2, mas a queima do PP é capaz de liberar 129% a mais de energia. Novamente considerando um critério de proporcionalidade, o PP é considerado como melhor opção para fabricação das hastes de cotonete.

Apesar de encontrar em referências bibliográficas que o bambu é considerado como um material sustentável, não foi o resultado encontrado neste trabalho. Não invalida as suas propriedades consideradas como sustentáveis, mas cabe a percepção de que se deve estudar as aplicações dos materiais para de fato classificá-los de uma forma como essa, não generalizando por análises isoladas.

Quanto ao PP, apesar de ser um dos polímeros termoplásticos mais produzidos e, consequentemente, descartados no meio ambiente, como visto anteriormente, pode apresentar um bom desempenho ambiental quando comparado com outros materiais. Entende-se que a maior problemática associada aos impactos ambientais relativos ao consumo elevado de PP seja a destinação final desse material. Pode ser reciclado, mas por ser descartado de forma inapropriada ou misturada com resíduos orgânicos, inviabiliza este processo, encerrando o ciclo de vida do material.

Como apresentado anteriormente nos exemplos de aplicação da ferramenta ACV, os resultados obtidos no presente trabalho condizem com os dados destas citadas referências. Tanto no trabalho de Mujovo *et al.* (2013) quanto de Braskem (2015), os materiais poliméricos apresentaram desempenho ambiental superior quando comparados com as alternativas estudadas para fabricação de embalagens de chocolate e de copos reutilizáveis ou descartáveis, objetos de estudo respectivos a cada avaliação.

5 CONCLUSÃO

Os impactos causados ao meio ambiente pelo elevado consumo de materiais são numerosos e, por vezes, severos. Deve-se ter cuidado com as escolhas feitas em todo ciclo de vida dos produtos, pois em cada fase há consequências. Através da utilização da metodologia ACV, toma-se conhecimento dos pontos críticos dos ciclos de vida e, baseando-se nestas informações, decisões de melhorias podem ser tomadas.

Através da análise dos resultados obtidos neste trabalho, foi possível concluir que, tanto para fabricação dos cabos de escovas de dente quanto das hastes dos cotonetes, o PP é uma melhor opção em comparação aos materiais naturais estudados, considerando critério de desempenho ambiental.

Isso pôde ser concluído devido aos menores impactos ambientais gerados pelo seu ciclo de vida, na categoria de Esgotamento de Água, quando comparado ao bambu, e nas categorias de Esgotamento de Água e Mudança Climática, ao compará-lo com o papel. Avaliando os impactos ambientais da etapa final do ciclo de vida destes materiais, foi realizada uma ponderação entre as possíveis destinações e consequências atreladas a estas, também concluindo que o PP seja uma melhor opção no quesito desempenho ambiental.

Deve-se levar em consideração que estes resultados não representam fielmente a realidade, dadas as limitações encontradas na construção do trabalho, pois:

- O sistema de produto considera apenas algumas das etapas do ciclo de vida dos produtos;
- Foram avaliados apenas os materiais do cabo da escova e das hastes dos cotonetes (para fins de comparação é válido, mas representam apenas parte de todo ciclo de vida destes produtos);
- O valor atribuído para as distâncias percorridas nos transportes não corresponde a dados reais;
- Foram analisadas apenas duas categorias de impacto ambiental;
- Para o processamento do cabo de bambu, foram realizadas hipóteses para definição do valor de massa usinada;

- Os dados utilizados para construção das ICVs foram obtidos por duas fontes diferentes – o que pode ter comprometido mais severamente os resultados dos cotonetes.

Entende-se, também, que os valores de impacto obtidos em um estudo de ACV são apenas estimativas do que são os impactos reais. É inerente ao processo de cálculo dos impactos a realização de ajustes dos valores dos fluxos para adequar aos critérios de quantificação dessas grandezas.

As limitações dos trabalhos de ACVs são complicações previstas em norma e, por disso, entende-se que os resultados são válidos para a finalidade do trabalho.

REFERÊNCIAS

ABNT (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉNICAS). **NBR ISO 14040**: gestão ambiental - avaliação do ciclo de vida - princípios e estrutura. Rio de Janeiro, nov. 2001.

ABIPLAST (Associação Brasileira da Indústria do Plástico). **Perfil 2019**. 53p. São Paulo, 2019.

ACV BRASIL. **Softwares**. Disponível em: https://acvbrasil.com.br/softwares. Acesso em: 26 nov. 2020.

ASHBY, Michael; SHERCLIFF, Hugh; CEBON, David. ***Materials****: engineering, science, processing and design*. Oxford: Elsevier, 2007.

ASHBY, Michael. ***Materials and Sustainable Development***. Cambridge: Elsevier, 2016.

BAMBOOBRUSH. ***BAMBOO TOOTHBRUSH PRODUCTION****: eco friendly*. ECO FRIENDLY. Disponível em: https://bambuubrush.com/pages/journey. Acesso em: 20 nov. 2020.

BRASKEM. **Avaliação do Ciclo de Vida comparativa entre Copos Descartáveis e Copos Reutilizáveis**. São Paulo: ACV Brasil, 2015.

CALLISTER JUNIOR, Willian D.; RETHWISCH, David G. **Ciência e Engenharia de Materiais**: uma introdução. 8. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2012.

CANEVAROLO JUNIOR, Sebastião V. **Ciência dos polímeros**: um texto básico para tecnólogos e engenheiros. 2. ed. São Carlos: Artliber, 2006.

CASTRO, Ana Lídia de Almeida *et al*. Escassez hídrica. In: UGAYA, Cássia Maria Lie; ALMEIDA NETO, José Adolfo de; FIGUEIREDO, Maria Cléa Brito de

(org.). **Recomendação de modelos de Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida para o Contexto Brasileiro**. Brasília: Ibict, 2019. p. 90-123.

CHAVES, Léo Ramos. **Planeta plástico**. 2019. Disponível em: https://revistapesquisa.fapesp.br/planeta-plastico/. Acesso em: 5 jun. 2020.

COGDELL. ***Plastic toothbrush***. 2014. Disponível em: http://www.designlife-cycle.com/plastic-toothbrush. Acesso em: 26 nov. 2020.

COTONETE. In: DICIO, Dicionário Online de Português. Porto: 7Graus, 2020. Disponível em: https://www.dicio.com.br/cotonete/. Acesso em: 26/11/2020.

EARTH OVERSHOOT DAY. **O Dia da Sobrecarga da Terra assinala-se a 22 de agosto, três semanas mais tarde do que o ano passado.** Disponível em: https://www.overshootday.org/newsroom/press-release-june-2020-portuguese/. Acesso em: 16 jun. 2020

ENCYCLOPEDIA.COM. ***Cotton Swab***. Disponível em: https://www.encyclopedia.com/manufacturing/news-wires-white-papers-and-books/cotton-swab. Acesso em: 15 jun. 2020.

EUROPEAN COMMISSION. ***International Reference Life Cycle Data System (ILCD) Handbook****: general guide for life cycle assessment - detailed guidance. Luxemburgo: Publications Office Of The European Union*, 2010.

FERRANTE, Maurizio. SELEÇÃO DE MATERIAIS E PROCESSOS: meio ambiente. In: FERRANTE, Maurizio. **Seleção de materiais**. Edufscar, 2013. p. 317-329.

GALDIANO, G. P. **Inventário do ciclo de vida do papel offset produzido no Brasil**. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Química. São Paulo/SP, 2006.

GEYER, Roland; JAMBECK, Jenna R., LAW, Kara Lavender. ***Production, use, and fate of all plastics ever made.*** *Science Advances.* 19 jul 2017: Vol. 3, no. 7, e1700782, DOI: 10.1126/sciadv.17007822017. Disponível em: https://advances.sciencemag.org/content/3/7/e1700782. Acesso em: 05 nov. 2020.

GHAVAMI, Khosrow; MARINHO, Albanise. **Propriedades físicas e mecânicas do colmo inteiro do bambu da espécie Guadua angustifólia. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental.** 2005. Disponível em: https://doi.org/10.1590/S1415-43662005000100016. Acesso em: 3 nov. 2020.

GRANTA EDUPACK. Versão 20.1.0. Granta Design Limited. 2020.

GUINÉE, J.B. ***Development of a methodology for the environmental life-cycle assessment of products: with a case study on margarines***, 1995.

HUNT, R.G.; FRANKLIN, W.E. ***LCA*** *— How it came about. Personal Reflections on the Origin and the Development of LCA in the USA*. Int. J. LCA, vol. 1 (1) 4-7. Landsberg, Germany, 1996.

IBICT (INSTITUTO BRASILEIRO DE INFORMAÇÃO EM CIÊNCIA E TECNOLOGIA). **ACV** - Ibict - Avaliação do Ciclo de Vida. Disponível em: http://acv.ibict.br/. Acesso em: 21 abr. 2020.

INMETRO (INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, QUALIDADE E TECNOLOGIA). **Programa Brasileiro de Avaliação do Ciclo de Vida** (PBACV). Disponível em: http://rweb01s.inmetro.gov.br/qualidade/pbacv/objetivo.asp. Acesso em: 21 maio 2020.

JOHNSON & JOHNSON. **História Cotonetes**. Disponível em: https://www.jnjbrasil.com.br/historiacotonetes. Acesso em: 15 jun. 2020.

KYUNG-TAE, Lee; GEUN-WOO, Park; EUN-SEOP, Kim. ***Manufacturing method for bamboo toothbrush and bamboo toothbrush manufactured by the same***. Depositantes: Lee Kyung-tae, Park Geun-woo, Kim Eun- seop. KR n°

KR102019665B1. Depósito: 16 jan. 2019. Disponível em: https://patents.google.com/patent/KR102019665B1/en?q=bamboo+toothbrush+manufacturing&oq=bamboo+toothbrush+manufacturing. Acesso em: 13 nov. 2020.

LEVASSEUR, Annie *et al*. *Greenhouse gas emissions and climate change impacts*. In: PROGRAMME, United Nations Environment. ***Global Guidance for Life Cycle Impact Assessment Indicators***: volume 1. 2016. p. 58-75.

LIEBL NETO, Francisco. **Caracterização de propriedades físicas e mecânicas da espécie de bambu *phyllostachys aurea* da região de Pato Branco**. 96p. Trabalho de Conclusão de Curso; Universidade Tecnológica Federal do Paraná - Curso de Engenharia Civil. Pato Branco / 2017.

LOWY, MICHAEL. Crise ecológica e crise de civilização: a alternativa ecossocialista. In: LÉNA, P.; NASCIMENTO, E.P. **Enfrentando os limites do crescimento**: sustentabilidade, decrescimento e prosperidade. Rio de Janeiro: Garamond, 2012.

MADE HOW. ***Cotton swab***. Disponível em: http://www.madehow.com/Volume-4/Cotton-Swab.html. Acesso em: 8 nov. 2020

MADE HOW. ***Toothbrush***. Disponível em: http://www.madehow.com/Volume-2/Toothbrush.html. Acesso em: 8 nov. 2020

MANO, Eloisa Biasotto; MENDES, Luis Claudio. **INTRODUÇÃO A POLÍMEROS**. 2. ed. São Paulo: Edgard Bluncher Ltda., 2004.

MANO, Eloisa Biasotto; PACHECO, Élen B. A. V.; BONELLI, Cláudia M. C. **Meio ambiente, poluição e reciclagem**. São Paulo: Edgard Blucher, 2005.

MANZINI, Ezio; VEZZOLI, Carlo. **O Desenvolvimento de Produtos Sustentáveis**: os requisitos ambientais dos produtos industriais. São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo, 2002.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE (MMA); SECRETARIA DE QUALIDADE AMBIENTAL (SQA)**. Plano nacional de resíduos sólidos**. 187p. Brasília, 2019.

MYSA. ***How Toothbrushes Affect the Environment: An Infographic***. Disponível em: https://www.foreo.com/mysa/how-toothbrushes-affect-environment-infographic/#:~:text=Ever%20wonder%20what%20happens%20to,the%20trash%20every%20three%20months%3F&text=One%20billion%20plastic%20toothbrushes%20are,million%20pounds%20of%20waste%20annually. Acesso em: 26 nov. 2020.

MOTTA, W.H. **Ciclo de vida do produto e a geração de ecoinovações**: desafios para o brasil. 2016. 218 f. Tese (Doutorado) - Curso de Ciência da Informação, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2016.

MUJOVO, Marla Josefa *et al*. Avaliação do Ciclo de Vida: uma comparação de embalagens de papel e plástico para chocolates. ***Ingeniería Industrial****: Actualidad y Nuevas Tendencias*, Florianópolis, v., n. 12, p. 78-90, 2013. Disponível em: http://www.riuc.bc.uc.edu.ve/bitstream/123456789/1072/1/art06.pdf. Acesso em: 15 jun. 2020.

NETTO, Flávia dos Santos Fagundes Ferreira; SOUZA, Adriana Martinelli Catelli de. **Reciclagem de escovas de dentes pós-consumo**. Centro Universitário FEI, São Bernardo do Campo, 2015.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS (ONU). **O futuro que queremos**: declaração final da conferência das nações unidas sobre desenvolvimento sustentável (rio + 20). Rio de Janeiro: 2012.

PLASTICSEUROPE (org.). ***Plastics - the Facts 2019****: an analysis of european plastics production, demand and waste data*. Bélgica: 2019.

Q-TIPS®.***THE "Q" STANDS FOR QUALITY!****: a Q-tips® cotton swabs history.* Disponível em: https://www.qtips.com/about/. Acesso em: 15 jun. 2020.

QUARTIM, Elisa. **ACV**: análise do ciclo de vida. Análise do Ciclo de vida. 2010. Disponível em: http://embalagemsustentavel.com.br/2010/05/07/acv-analise-do-ciclo-de-vida/. Acesso em: 15 jun. 2020.

SUPER INTERESSANTE. Quando surgiu a escova de dente? **Super interessante**, 4 jul. 2018. Disponível em: https://super.abril.com.br/mundo-estranho/quando-surgiu-a-escova-de-dente/. Acesso em: 14 jun. 2020.

SUPER INTERESSANTE. Quem inventou o cotonete? **Super interessante**, 14 fev. 2020. Disponível em: https://super.abril.com.br/mundo-estranho/quem-inventou-o-cotonete/https://super.abril.com.br/mundo-estranho/quando-surgiu-a-escova-de-dente/. Acesso em: 15 jun. 2020.

RODRIGUES, Taynara. **Polímeros nas indústrias de embalagens**. 2018. Disponível em: https://repositorio.ufu.br/bitstream/123456789/24082/1/Pol%C3%ADmerosInd%C3%BAstriasEmbalagens.pdf. Acesso em: 5 jun. 2020.

RODRIGUES, Toninha. Como surgiu a escova de dentes? **Super interessante**, 9 ago. 2017. Disponível em: https://super.abril.com.br/saude/como-surgiu-a-escova-de-dentes/. Acesso em: 14 jun. 2020.

SEBRAE. **Pensamento do ciclo de vida**: negócios conscientes a caminho da sustentabilidade. Cuiabá, MT: Sebrae, 2017.

SEO, E.S.M.; KULAY, L. A. Avaliação do ciclo de vida: ferramenta gerencial para tomada de decisão. **InterfacEHS. Revista de gestão integrada em saúde do trabalho e meio ambiente**, 2006. Disponível em: http://www3.sp.senac.br/hotsites/blogs/InterfacEHS/wp-content/uploads/2013/07/2006-v1-art4-portugues.pdf. Acesso em: 16 maio 2020.

THE CLUB OF ROME. ***About The Club of Rome***. Disponível em: https://clubofrome.org/about-us/. Acesso em: 13 maio 2020.

UNEP (UNITED NATIONS ENVIRONMENTAL PROGRAM). **O *Business Case* para Ecoinovação**. 2014.

VIRTUAL DENTAL MUSEUM. ***Different Strokes for Different Folks****: a history of the toothbrush*. Disponível em: https://www.virtualdentalmuseum.org/exhibits/different-strokes-different-folks-history-toothbrush/. Acesso em: 14 jun. 2020.

WILL, Jamie. ***Global Cotton Buds Market Size, Market Share, Application Analysis, Regional Outlook, Growth Trends, Key Players, Competitive Strategies and Forecasts, 2018 to 2026***. 2017. Disponível em: https://www.researchandmarkets.com/research/wdrrk6/cotton_buds_world?w=5. Acesso em: 12 jun. 2020.

WORLD WILDLIFE FUND. **SOLUCIONAR A POLUIÇÃO PLÁSTICA**: transparência e responsabilização. Gland: Dalberg, 2019.