

André Pagotto de Arruda Lins Pires

ANÁLISE DE CICLO DE VIDA DE CÁPSULAS DE CAFÉ

**SÃO PAULO
2018**

TF-2018
P664a
H 2018Q
2913555

DEDALUS - Acervo - EPMT



31800009343

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

Catálogo-na-publicação

PIRES, ANDRÉ

ANÁLISE DE CICLO DE VIDA DE CÁPSULAS DE CAFÉ / A. PIRES – São Paulo, 2018.

68 p.

Trabalho de Formatura - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais.

1.Cápsulas de Café 2.Análise de Ciclo de Vida 3.Nespresso
I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais II.t.

André Pagotto de Arruda Lins Pires

ANÁLISE DE CICLO DE VIDA DE CÁPSULAS DE CAFÉ

Trabalho de formatura apresentado à
Escola Politécnica da Universidade de São
Paulo.

Programa de Graduação do
Departamento de Engenharia
Metalúrgica e de Materiais da Escola
Politécnica da USP

Orientador: Prof. Dr. Cesar Roberto de
Farias Azevedo

**SÃO PAULO
2018**

AGRADECIMENTOS

Agradeço a todos os meus amigos e colegas de estudo que tiveram participação em minha vida acadêmica e que contribuíram, de qualquer forma, para criar um ambiente harmonioso e produtivo.

Agradeço também a todos os professores e funcionários do Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais (PMT-USP) por se dedicarem ao ensino e a preservação do ambiente de estudo, em especial ao Prof. Dr. Cesar Roberto de Farias Azevedo, que me orientou, motivou, me auxiliou no desenvolvimento da tese do presente trabalho e, além de mentor, se tornou um grande amigo.

Por fim, agradeço aos meus pais, Carmen e José, pelas oportunidades que me proporcionaram e pela educação que me deram. Agradeço ao meu irmão Felipe Pires por toda orientação que me passou ao longo da minha jornada na Escola Politécnica. E agradeço profundamente minha namorada Juliana de Ornelas Arcieri que sempre me apoiou e motivou, principalmente nos momentos mais turbulentos e quando mais precisei.

RESUMO

Em decorrência do imenso avanço do consumo de café no Brasil ao longo dos últimos anos, os consumidores se tornaram mais exigentes e surgiram necessidades de adequação ao novo ritmo acelerado da população e maiores requisitos em relação à qualidade do café, impulsionando as indústrias ao mercado de cápsulas de café. Por consequência, o aumento da produção de cápsulas e a geração de resíduo provocam um grande impacto ao meio ambiente, em termos energéticos e principalmente na pegada de CO₂. Os quatro principais tipos de cápsulas de café estudados foram: de alumínio, de polipropileno, de políácido láctico e de aço inoxidável. Por meio da Análise de Ciclo de Vida (ACV) das cápsulas de café, através da ferramenta *Eco-Audit Tool*, do software CES EduPack, foi possível comparar a pegada energética e a pegada de CO₂ dos quatro tipos de cápsulas de café convencionais atualmente no Brasil. Das análises, concluiu-se que a cápsula reutilizável de aço inoxidável 316L possui a menor pegada de CO₂ e é a mais ecologicamente correta, dentre os quatro tipos estudados, contrariamente ao que é divulgado pelo *marketing* das principais indústrias de cápsulas de café.

Palavras-Chave: Cápsulas de Café, Análise de Ciclo de Vida, alumínio, polipropileno, políácido láctico, aço inoxidável 316L, Nespresso.

ABSTRACT

As a result of the huge increase in coffee consumption in Brazil over the last years, consumers have become more demanding and necessities of adaptation to the new fast pace of the population and greater requirements with respect to the quality of the coffee appeared, boosting the industry to the coffee capsule market. As a consequence, the increase in coffee capsule production and waste generation have a major impact on the environment in terms of energy and especially CO₂ footprint. The four main types of coffee capsules studied were: aluminum, polypropylene, lactic acid and stainless steel. Through the Life Cycle Analysis (LCA) of the coffee capsules, using the tool Eco-Audit Tool, on CES EduPack software, it was possible to compare the energy footprint and the CO₂ footprint of the four conventional types of coffee capsules currently in the Brazil. As a result of the analysis, it was concluded that the reusable 316L stainless steel capsule has the lowest CO₂ footprint and is the most environmentally correct among the four capsules studied, contrary to what is disclosed by the marketing of the main coffee capsule industries.

Keywords: Coffee Capsules, Life Cycle Analysis, aluminium, polypropylene, polylactic acid, 316L stainless steel, Nespresso.

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Evolução da produção cafeeira ao longo dos últimos anos.	1
Figura 2: Fases do ciclo de vida de um produto.	6
Figura 3: Quantificação energética das seis etapas da ACV.	9
Figura 4: Método de eco-auditoria energética.	13
Figura 5: Representação resumida do ciclo da cápsula de café.	16
Figura 6: Interface do <i>Eco-Audit Tool</i> para fase material, manufatura e fim de vida.	18
Figura 7: : Interface do CES no módulo <i>Eco Audit Tool</i> para a fase transporte.	21
Figura 8: Entrada de dados do CES no módulo <i>Eco Audit Tool</i> para a fase transporte.	22
Figura 9: Interface do CES no módulo <i>Eco Audit Tool</i> para a fase Uso.	22
Figura 10: Entrada de dados do CES no módulo <i>Eco Audit Tool</i> para a fase Uso.	23
Figura 11: Máquina Nespresso Essenza Mini.	23
Figura 12: Composição de uma cápsula de aço inoxidável.	25
Figura 13: Cápsula de aço inoxidável.	25
Figura 14: Estrutura geral de uma cápsula de café.	26
Figura 15: Fluxograma simplificado do consumo de um copo de café.	26
Figura 16: Processo de enchimento de café nas cápsulas.	27
Figura 17: Prensagem de cápsulas de alumínio.	30
Figura 18: Unidade química estrutural de repetição do polipropileno, de 165 e 177°C.	31
Figura 19: Síntese das propriedades gerais do polipropileno.	31
Figura 20: Filtro de Polipropileno que se situa na base da cápsula.	36
Figura 21: Membrana de alumínio e de polietileno, da esquerda para a direita.	36
Figura 22: Dados de entrada para 1000 cápsulas de alumínio, destinadas à reciclagem.	37
Figura 23: Gráfico de ACV de energia e pegada de CO ₂ de 1000 cápsulas de alumínio, destinadas à reciclagem.	38
Figura 24: Dados de entrada para 1000 cápsulas de alumínio, destinadas ao aterro.	39
Figura 25: Gráfico de ACV de gasto energético e pegada de CO ₂ de 1000 cápsulas de alumínio, destinadas ao aterro.	40
Figura 26: Dados de entrada para 1000 cápsulas de polipropileno, destinadas à reciclagem. ..	41
Figura 27: Gráfico de ACV de gasto energético e pegada de CO ₂ de 1000 cápsulas de polipropileno, destinadas à reciclagem.	42
Figura 28: Dados de entrada para 1000 cápsulas de polipropileno, destinadas ao aterro.	43
Figura 29: Gráfico de ACV de gasto energético e pegada de CO ₂ de 1000 cápsulas de polipropileno, destinadas ao aterro.	44
Figura 30: Dados de entrada para 1000 cápsulas de PLA, destinadas ao aterro.	45
Figura 31: Gráfico de ACV de gasto energético e pegada de CO ₂ para 1000 cápsulas de PLA. ..	46
Figura 32: Dados de entrada para a cápsula de aço inoxidável 316L.	47
Figura 33: Gráfico de ACV de gasto energético e pegada de CO ₂ da cápsula de aço inoxidável 316L.	48
Figura 34: ACV comparativa das quatro cápsulas, com fim de vida reciclagem e aterro para as cápsulas de Alumínio e de Polipropileno, sobre pegada de CO ₂	49
Figura 35: ACV comparativa das quatro cápsulas, com fim de vida reciclagem e aterro para as cápsulas de Alumínio e de Polipropileno, sobre pegada energética.	51

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1: Pegada de energia e CO ₂ na mineração para a obter 1 kg de metais	10
Tabela 2: Energia embutida no processamento de materiais metálicos.....	11
Tabela 3: Energia embutida na extração para obtenção de 1 kg de polímero.....	11
Tabela 4: Energia envolvida na injeção de peças plásticas, matriz de energia elétrica da Austrália.....	12
Tabela 5: Tabela de materiais e processos primários disponíveis no CES EduPack.....	19
Tabela 6: Aplicabilidade das opções de “End of Life” e descarte nos materiais.....	20
Tabela 7: Pegada ambiental para os tipos de transportes do CES EduPack.....	21
Tabela 8: composição material das cápsulas.....	25
Tabela 9: Características gerais do Alumínio.....	28
Tabela 10: características gerais da Liga de Alumínio 1100.....	29
Tabela 11: Lista de componentes e materiais para a cápsula de alumínio.....	35
Tabela 12: Lista de componentes e materiais para a cápsula de Polipropileno.....	35
Tabela 13: Lista de componentes e materiais para cápsula de PLA.....	36
Tabela 14: Lista de componentes e materiais para a cápsula de aço inoxidável.....	36
Tabela 15: Análise de Ciclo de Vida de 1000 cápsulas de alumínio, destinadas à reciclagem. ..	38
Tabela 16: Análise de Ciclo de Vida de 1000 cápsulas de alumínio, destinadas ao aterro.....	40
Tabela 17: Análise de Ciclo de Vida de 1000 cápsulas de polipropileno, destinadas à reciclagem.....	42
Tabela 18: Análise de Ciclo de Vida de 1000 cápsulas de polipropileno, destinadas ao aterro.....	44
Tabela 19: Análise de Ciclo de Vida de 1000 cápsulas de PLA.....	46
Tabela 20: Análise de Ciclo de Vida da cápsula de aço inoxidável.....	48
Tabela 21: Comparativo de pegada de CO ₂ (kg) entre as quatro cápsulas de café, com fim de vida reciclagem e aterro para as cápsulas de Alumínio e de Polipropileno.....	50
Tabela 22: Comparativo de pegada de energia (MJ) entre as quatro cápsulas de café, com fim de vida reciclagem e aterro para as cápsulas de Alumínio e de Polipropileno.....	52

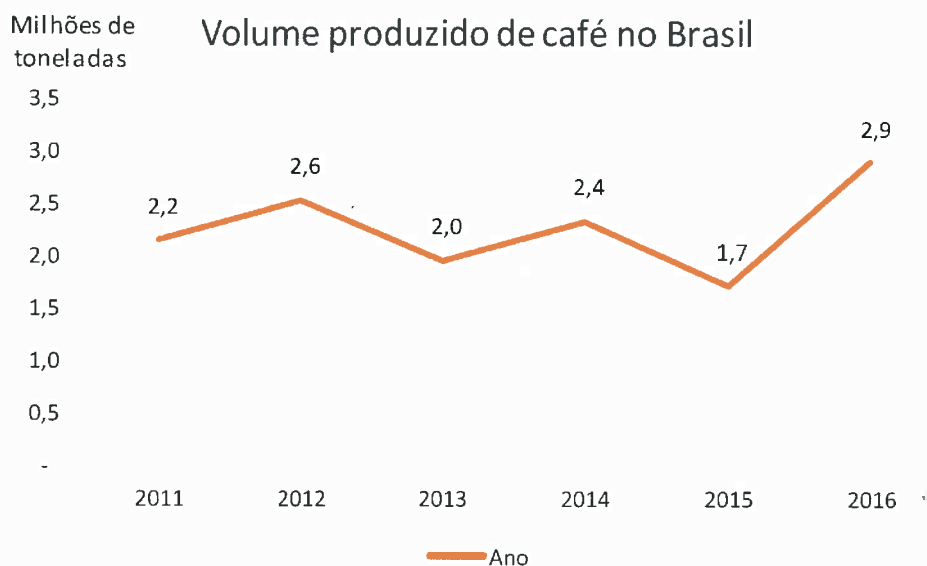
Sumário

1. INTRODUÇÃO.....	1
2. JUSTIFICATIVA.....	5
2.1. OBJETIVOS.....	5
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	6
3.1. ANÁLISE DE CICLO DE VIDA	6
3.2. ETAPAS DA ANÁLISE DO CICLO DE VIDA	8
3.2.1. ENERGIA INCORPORADA	10
3.2.2. ECO-AUDITORIA	12
3.3. A PROBLEMÁTICA DA RECICLAGEM DAS CAPSULAS E DO CAFÉ.....	14
4. METODOLOGIA.....	17
4.1. CAMBRIDGE ENGINEERING SELETOR (CES).....	17
4.2. FERRAMENTA DE AUDITORIA AMBIENTAL (<i>ECO-AUDIT TOOL</i>).....	17
4.3. MATERIAIS, MANUFATURA E FINAL DE VIDA.....	17
4.4. TRANSPORTE.....	20
4.5. USO, DESCARTE E POTENCIAL DE FIM DE VIDA	22
4.6. CÁPSULAS UTILIZADAS	24
4.6.1. CÁPSULA DE ALUMÍNIO.....	28
4.6.2. CÁPSULA DE POLIPROPILENO.....	30
4.6.3. CÁPSULA DE POLIÁCIDO LÁCTICO	33
4.6.4. CÁPSULA DE AÇO INOXIDÁVEL.....	34
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	35
5.1. ANÁLISE DE CICLO DE VIDA DAS CÁPSULAS	35
5.1.1. INVENTÁRIO DOS MATERIAIS.....	35
5.1.2. ACV DA CÁPSULA DE ALUMÍNIO	37
5.1.3. ACV DA CÁPSULA DE POLIPROPILENO	41
5.1.4. ACV DA CÁPSULA DE POLIÁCIDO LÁCTICO	45
5.1.5. ACV DA CÁPSULA DE AÇO INOXIDÁVEL.....	47
5.1.6. ACV COMPARATIVO DAS CÁPSULAS.....	49
6. CONCLUSÕES.....	53
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	56

1. INTRODUÇÃO

O café é uma bebida com sabor intenso e aroma forte, de consumo caseiro ou social, e tornou-se parte de um hábito diário de grande parte da população mundial. Segundo dados da *National Coffee Association* (NCA, 2015), o café é atualmente a segunda bebida mais consumida do mundo, atrás apenas da água. O setor de cafeicultura brasileira vem crescendo e se desenvolvendo gradativamente nos últimos tempos, mesmo em um período econômico conturbado pelo qual o Brasil vem passando. Com demandas cada vez maiores e mais exigentes, a indústria é obrigada a acompanhar o dinamismo do mercado e atender as necessidades de seus consumidores, como pode ser observado na Figura 1, sobre a evolução da produção de café no Brasil nos últimos anos ⁽¹⁾.

Figura 1: Evolução da produção cafeeira ao longo dos últimos anos.



Fonte: ABIC, 2017 ⁽¹⁾.

A “toma de café” é um hábito presente no dia a dia de inúmeras pessoas. Seu consumo remonta ao século XVI, quando foi amplamente difundido pela Europa. Alguns séculos mais tarde, com o desenvolvimento das economias mundiais e com a evolução da sociedade, surgiu o processo de empacotamento à vácuo do café em 1900, facilitando seu armazenamento e conservação. Já em 1901, surgiram os primeiros cafés solúveis. Entretanto, com a globalização e aumento do estilo de vida mais acelerado, surgiu a necessidade de desenvolvimento de um processo mais rápido e simples de preparação de café. Então, em 1970, surgem as primeiras cápsulas, fabricadas pelo suíço Jean-Paul Gaillard e, em 1986, é lançada a *Nespresso*, marca de café mais comercializada atualmente ⁽³⁾.

O consumidor brasileiro não reduziu o consumo de café no ano 2017, mesmo diante da crise econômica. O crescimento de 3,6% no consumo de café é o dobro do crescimento médio mundial, o que significa que a indústria brasileira consumiu 772 mil sacas (de 60kg) a mais do que em 2016. A Associação Brasileira da Indústria de Café (ABIC) estima que o consumo de café volte a crescer ao patamar dos 21,9 milhões de sacas no ano de 2018. Segundo projeção do relatório Tendências do Mercado de Cafés, as taxas de crescimento do consumo no Brasil entre 2017 a 2021 serão de 3,3% para o café em pó, de 4,3% para o café torrado e 9% de café em cápsulas ⁽¹⁾.

Segundo Sr. Ricardo de Sousa Silveira, presidente da ABIC, a maturidade do mercado brasileiro de café fez surgirem novas alternativas de negócios, novos canais de distribuição e novas categorias em crescimento acelerado. Os consumidores tornaram-se mais conhecedores dos tipos e qualidades do café, mais exigentes e mostraram disposição para pagar mais pelos produtos de sua preferência, desde que com qualidade e garantia de segurança alimentar. Assim, o Brasil parece estar vivenciando uma nova onda do café, com expansão do consumo de cafés preparados de formas distintas, onde o setor da indústria de café tem recebido grandes investimentos na aquisição de empresas; na implantação de novas unidades industriais; na implantação de novas tecnologias e equipamentos; e no desenvolvimento de novos produtos que se mostrem substitutos de parcela do mercado dos cafés tradicionais, tais como as cápsulas de café. Para fazer face às exigências dos consumidores, desenvolveram-se, então, diferentes tipos de cápsulas, com formas e molduras diversificadas, capazes de responder, eficazmente, aos requisitos exigidos, sobretudo, na preservação das propriedades do café ⁽⁶⁾.

O consumo de café em monodoses, seja na forma de cafés expressos, seja em sachês ou em cápsulas, está crescendo acentuadamente no Brasil. Segundo a EUROMONITOR, as vendas em valor das cápsulas em 2015 alcançaram R\$ 1,4 bilhão, com estimativa de que atinjam R\$ 2,96 bilhões em 2019. Como um dos maiores produtores e consumidores de café mundiais, o Brasil é considerado um mercado estratégico para o setor ⁽⁷⁾. Os brasileiros consomem cerca de 225 mil xícaras da bebida por minuto e 3% das vendas de café são em cápsulas, segundo a Associação Brasileira do Alumínio (ABAL) ⁽⁵⁾. Em 2015, foram consumidas 520 milhões de cápsulas de café no Brasil, o equivalente a aproximadamente 3.120 toneladas de café orgânico e a 1.560 toneladas de embalagem, considerando que a cápsula é composta de aproximadamente 3g de embalagem e 6g de café orgânico, no caso de uma embalagem de PLA (P&Q Engenharia). Segundo estimativas da ABIC, o consumo em 2017 foi de aproximadamente 3 bilhões de cápsulas no Brasil e a tendência é de que este número cresça a taxas de 17% ao ano até 2020 ⁽⁶⁾.

Portanto, para crescer e se assegurar no mercado cafeeiro, a indústria deve investir na diversificação, na qualidade e no *merchandising* de seus produtos. Com o crescimento do consumo de cápsulas, o café torrado vem perdendo lugar, pois as

cápsulas apresentam vantagens como: doses únicas para evitar o desperdício de café, reprodutibilidade em qualidade de produto final, variedade no sabor do café e oferecem facilidade no preparo do café. Para manipulação da cápsula, basta ligar a máquina de café, adicionar um pouco de água, inserir uma cápsula, apertar um botão e o café está pronto, em apenas alguns segundos. Outro fator é que apesar das máquinas serem um pouco caras as cápsulas são aparentemente baratas, a limpeza na máquina quase não precisa ser feita (segundo a fabricante Nestlé, líder de mercado no segmento de café em cápsulas) e o desperdício de água e café é quase zero, já que o tamanho da bebida é sob medida para a ingestão imediata. E, para garantir estes requisitos ao consumidor, um dos desafios mais relevantes é o desenvolvimento de cápsulas baratas, eficientes e ambientalmente corretas ⁽⁹⁾.

Segundo NEUZA JORGE (2013), a embalagem é o veículo de informação sobre o produto, tanto para informações ao consumidor, quanto para sua cadeia de distribuição e venda. Neste último caso, a embalagem transmite informação para a gestão de estoques, instruções de armazenamento e de manuseio e de preço, além de permitir a identificação e rastreabilidade do produto, pelo seu lote. Ademais, o setor de desenvolvimento de embalagem industrial é extremamente importante para a indústria, pois é a embalagem que vai garantir o frescor e a qualidade do produto. E é por meio da embalagem que ocorrerá o primeiro contato do consumidor com o produto. A embalagem se tornou item fundamental no fator decisório do consumo, tanto na questão de armazenamento, quanto na de estocagem do produto e na manipulação do mesmo. Então, se uma marca quiser se assegurar como líder de mercado, seus produtos devem possuir embalagem eficiente e impactante, de modo que o consumidor se sinta confortável e satisfeito com o produto. Entretanto, a embalagem de um produto é um item que provoca um grande custo à empresa, de modo a diminuir seu impacto na rentabilidade da companhia. Ainda de acordo com Neuza Jorge, o desenvolvimento de uma embalagem industrial é um procedimento complexo que tem como base um amplo processo de seleção de materiais. Para realizar este processo deve-se conhecer a função do produto e entender as restrições que o envolvem, além de saber qual o objetivo da seleção de materiais para este produto e quais são as variáveis livres ⁽¹⁰⁾.

Em uma sociedade com políticas de redução de emissão de gases que contribuem ao efeito estufa, tais como o protocolo de Kyoto, o qual visa à diminuição gradativa da emissão de gás carbônico, cada vez mais se fazem necessárias análises sobre os potenciais impactos dos produtos para o meio ambiente ⁽⁷⁾. Ademais, o setor de desenvolvimento de embalagens industriais tem demandas exigentes e políticas internas de redução de emissão de gases como parte de suas metas. E estas solicitações ambientais, ao longo do tempo, promoveram o desenvolvimento de normas referentes à análise de ciclo de vida, tais como a ISO 14040 ⁽¹⁴⁾.

Segundo CLAUDINO e TALAMINI (2013), a análise de ciclo de vida é um procedimento de avaliação de desempenho ambiental do produto, incluindo a quantificação da energia e das matérias-primas utilizadas em sua fabricação; ou seja, é uma técnica de análise que engloba os impactos ambientais ao longo da vida de um produto ou processo, visando identificar qual etapa de sua vida é a mais crítica. Estas etapas da vida são divididas em cinco fases: material, manufatura, transporte, utilização e descarte e final de vida ⁽¹²⁾.

Neste estudo serão comparadas as análises de ciclo de vidas (ACV) de quatro tipos de cápsulas de café: aço inoxidável, alumínio, PP (polipropileno) e PLA (poliácido láctico). A ACV será realizada por meio do *software* CES EduPack 2018, em seu módulo *Eco-Audit*, e, com isso, será possível identificar quais etapas da vida destes produtos são as mais críticas quanto a gastos energéticos e pegada de CO₂. Após a identificação da fase mais crítica, serão propostos novos objetivos e restrições ao projeto ambientalmente correto destas cápsulas, de modo a minimizar os impactos energéticos e ambientais.

2. JUSTIFICATIVA

Este trabalho tem como objetivo estudar as principais cápsulas de café utilizadas na indústria cafeeira brasileira contemporânea, identificando, por meio de análise de ciclo de vida quais cápsulas são as mais adequadas em termos ambientais, tais como pegada de CO₂, especialmente na fase de obtenção de material e descarte (que será o lixo comum, já que não existe um programa de coleta de cápsulas bem consolidado ainda no Brasil).

Inicialmente, por meio da análise de ciclo de vida, identifica-se a etapa mais crítica da vida destes produtos, nos quesitos pegada energética e de emissão de CO₂. Após a ACV, é possível identificar qual tipo de cápsula possui a menor pegada de CO₂ e discutir os possíveis descartes e o avanço da reciclagem ou reutilização da embalagem, o qual vem ganhando espaço com o desenvolvimento das cápsulas de aço inoxidável.

2.1. OBJETIVOS

- Comparar a pegada de CO₂ das principais cápsulas de café da atualidade.
- Comparar a influência do destino de fim de vida aterro sanitário e reciclagem, na pegada de CO₂.
- Identificar o tipo de cápsula que possui a menor pegada de CO₂.
- Desmentir as informações propagadas na atualidade sobre as cápsulas de alumínio pelo *marketing* das empresas, as quais objetivam maximizar seus lucros.

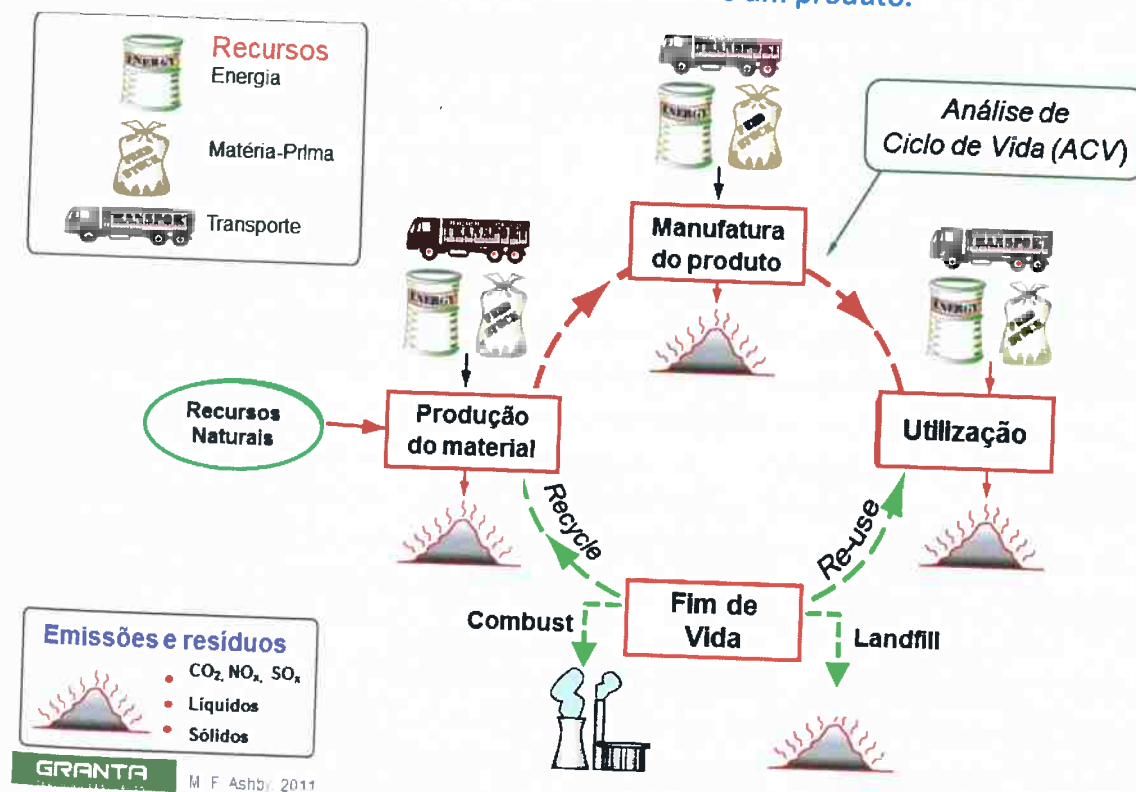
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. ANÁLISE DE CICLO DE VIDA

Toda atividade humana impacta de alguma maneira o ambiente no qual se localiza. Parte deste impacto pode ser absorvida pelo ambiente, entretanto, é claro que atualmente os impactos humanos excedem imensamente este limite com grande frequência, comprometendo a qualidade de vida e o bem-estar das futuras gerações. E boa parte deste impacto se deve à produção, confecção, utilização e disposição dos produtos utilizados pela sociedade ⁽¹¹⁾.

O impacto ambiental causado por um produto pode ser analisado pela Análise de Ciclo de Vida (ACV) dos materiais que o compõem, em função das etapas da vida e fim de vida do produto, conforme a Figura 2. As técnicas de ACV são agora documentadas por normas, tais como a ISO 14040 ⁽¹¹⁾, que possuem certo nível de rigor e que agora possibilitam a documentação de informações essenciais a respeito do fluxo energético e de emissões de todas as etapas da vida de um material ⁽¹⁸⁾.

Figura 2: Fases do ciclo de vida de um produto.



Fonte: GRANTA DESIGN, CAMBRIDGE, 2011 ⁽¹⁹⁾.

Em 1992, a Organização Internacional para a Normalização (ISO) criou um comitê técnico com o objetivo de normalização das práticas de gestão ambiental, incluindo ACV⁽¹⁴⁾. Até o presente momento foram desenvolvidas diversas normas, com base na ABNT e na ISO, tais como:

- ISO 14040 (1997 *Environmental management - Life cycle assessment - Principles and framework*): esta norma descreve os princípios e procedimentos necessários para realização de uma ACV, compreendendo as atividades de extração e aquisição da matéria prima, bem como a produção, utilização, reciclagem e por último a disposição final⁽¹¹⁾.
- ISO 14041 (1998 *Environmental management - Life cycle assessment – Goal and scope definition and inventory analysis*): esta norma, em complemento à ABNT NBR ISO 14040, especifica os requisitos e os procedimentos necessários para a compilação e preparação das definições do objetivo e do escopo de uma Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) e para a elaboração, interpretação e comunicação de uma análise de inventário do Ciclo de vida (ICV)⁽¹⁵⁾.
- ISO 14042 (2000 *Environmental management - Life cycle assessment – Life cycle impact assessment*): esta norma descreve e fornece orientação sobre a estrutura geral para a Avaliação do Impacto do Ciclo de Vida (AICV), etapa da Avaliação do Ciclo de Vida (ACV), sobre as características-chave e sobre as limitações inerentes da AICV. Especifica requisitos para conduzir a etapa de AICV e a sua relação com as outras etapas da ACV⁽¹⁶⁾.
- ISO 14043 (2000 *Environmental management – Life cycle assessment – Life cycle interpretation*): esta norma estabelece requisitos e recomendações para conduzir a interpretação do ciclo de vida em estudos de ACV ou ICV⁽¹⁴⁾.
- ISO/TR 14049 (2000 *Environmental management - Life cycle assessment - Examples of application of ISO 14041 to goal and scope definition and inventory analysis*): esta norma fornece exemplos sobre práticas para a condução de uma análise de inventário do ciclo de vida (ICV) como meio de se satisfazer determinadas disposições da NBR ISO 14041, fornecendo possíveis maneiras da aplicação da NBRISO14041. Estes exemplos refletem somente partes de um estudo completo de ICV⁽¹⁴⁾.
- ISO/TS 14048 (2002 *Environmental management - Life cycle assessment - Data documentation format*): esta especificação técnica fornece os requerimentos e os formatos necessários para documentação de informações, de modo a ser utilizado em documentações transparentes e consistentes, na coleta e no cálculo de informações e na qualidade da informação⁽¹⁴⁾.
- ISO/TR 14047 (2003 *Environmental management - Life cycle impact assessment - Examples of application of ISO 14042*): a finalidade desta norma é fornecer exemplos para ilustrar a prática atual da avaliação de impacto do ciclo de vida de acordo com NBR ISO 14042. Estes exemplos são somente uma amostra de todos os exemplos

possíveis que poderiam satisfazer as disposições da NBRISO14044. Oferecem uma “forma” ou “formas”, em vez de uma “única forma” de aplicar a NBRISO14042. Refletem os elementos-chave da fase da avaliação de impacto do ciclo de vida (AICV) da ACV. Os exemplos apresentados neste Relatório Técnico não são exclusivos, e outros exemplos existem para ilustrar as questões metodológicas descritas ⁽¹⁴⁾.

A partir do início da normalização das práticas de gestão ambiental, o conceito de análise de ciclo de vida vem se desenvolvendo cada vez mais, tendo até mesmo órgãos governamentais apoiando seus estudos e regulamentações, como o INMETRO ⁽¹⁷⁾. Além disso, há também o surgimento de consultorias voltadas para a sustentabilidade por meio da ACV, tais como a ACV Brasil e a EnCiclo. E apesar da normalização e regulamentação dos métodos de ACV, ainda assim é possível o surgimento de incertezas nos resultados práticos. As informações de entrada de dados, tais como recursos materiais e energéticos, podem ser facilmente monitorados. Já as emissões dependem de equipamentos precisos e sofisticados para um bom monitoramento. E as avaliações de impacto dependem de todos os valores de emissões, em todas as etapas, então, qualquer incerteza já compromete o resultado como um todo. Ademais, uma ACV completa leva bastante tempo e requer muitos detalhes ⁽¹⁷⁾.

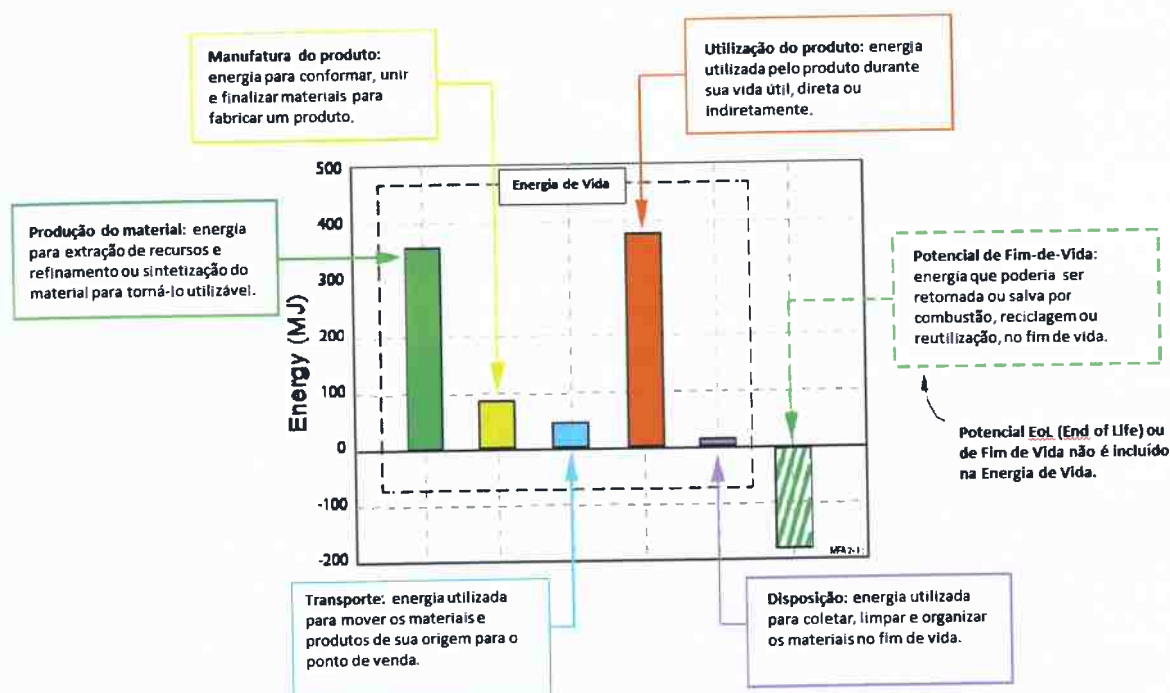
3.2. ETAPAS DA ANÁLISE DO CICLO DE VIDA

A análise do ciclo de vida estuda os aspectos ambientais e os impactos energéticos e ecológicos ao longo da vida de um produto, desde a aquisição da matéria prima, passando por sua fabricação, transporte, utilização e disposição. Sendo assim a técnica da ACV pode ser dividida em seis etapas, segundo SAUR ⁽²²⁾, conforme detalhada na Figura 3. A análise do material é a primeira etapa e engloba a energia utilizada e a emissão de material particulado e de CO₂ envolvidas na extração da matéria-prima e na produção do material primário (refino, sintetização e etc.). Já a análise da fabricação estuda a manufatura do produto (soldagem, usinagem, fundição e etc.) e seus impactos ambientais. A terceira etapa analisa a energia requisitada e os gases emitidos para transportar os materiais e produtos do seu ponto de origem para seu ponto de venda. A utilização do produto, quarta etapa, estuda a energia envolvida em trabalho em sua vida útil. A disposição, quinta etapa, reflete a pegada energética e de CO₂ impactada para coletar e eliminar o material no seu fim de vida. Já a última etapa, potencial de fim de vida, analisa a energia que pode ser recuperada ou preservada (ou crédito de carbono) no fim de vida do produto, por meio de combustão, reutilização ou até mesmo reciclagem ⁽¹⁹⁾.

Em seguida é realizada a avaliação dos resultados para uma ACV, isto é, a interpretação dos resultados, que é a última fase formal no procedimento ACV. Este processo tem como objetivo identificar qual fase da ACV é mais impactante nos fatores: energia incorporada (que é a energia necessária para criar o produto) e pegada de CO₂

(CO₂ emitido durante a obtenção, manufatura, uso, transporte e descarte do produto). De acordo com Ashby⁽¹⁸⁾, a pegada de carbono de um material é a massa de CO₂ liberado na atmosfera por unidade de massa de material (unidade expressa em kg/kg). Assim como o monóxido de carbono e o metano, deve-se preocupar com o CO₂ devido ao seu potencial de aquecimento global (*GWP – Global Warming Potential*), causado por sua capacidade de absorver a radiação infravermelha do sol.

Figura 3: Quantificação energética das seis etapas da ACV.



Fonte: SAUR, K. Life Cycle Interpretation (1997) ⁽²²⁾.

O estudo sobre energia envolvida durante o ciclo de vida de um produto chama a atenção, principalmente nos dias de hoje. Sabe-se que a maior fonte de geração de energia elétrica no Brasil provém de hidrelétricas e que nossas fontes de água já não são tão abundantes na natureza. Por isso, quantificar a energia envolvida durante o ciclo de vida de um produto torna-se importante e depender da matriz de energia elétrica de cada país ou unidade fabril. Identificar a fase de vida de um produto que mais consome energia também possibilita buscar estratégias para minimizar os desperdícios ou, até mesmo, utilizar outras fontes de energia, como por exemplo, no caso do carro, existe a possibilidade de escolha entre diesel, gasolina, etanol e eletricidade. De maneira análoga, é importante identificar a emissão de CO₂ gerada durante as mesmas fases de vida que esse produto possui. Embora existam outros gases poluentes, o CO₂ é mais comumente analisado em razão do contexto do aquecimento global, por se tratar do segundo maior contribuinte para este efeito. Em termos de efeito estufa, o gás metano é 21 vezes mais efetivo que o gás carbônico ⁽²¹⁾. A interpretação dos resultados de

análise de ciclo de vida é um procedimento sistemático, cujo objetivo é identificar, qualificar e analisar os resultados e, então, obter conclusões, esclarecer as premissas e elaborar sugestões baseadas nos resultados do estudo para reduzir o impacto ambiental de produtos e processos e para propor objetivos para o *eco-design* ⁽¹⁸⁾. A interpretação dos resultados de ACV é a última fase formal, tendo sido introduzida na metodologia do CES para solucionar questões e identificar novos objetivos para redução de dano ambiental ⁽²²⁾.

3.2.1. ENERGIA INCORPORADA

A energia incorporada é avaliada pela análise do fluxo de recursos, também conhecida como a energia empregada para criar 1 kg de material usável a partir dos seus minérios e matéria-prima (por exemplo: 1 kg de aço ou de PET ou de cimento em pó) ⁽²⁰⁾. No desenvolvimento deste trabalho, esta energia leva em consideração as diferentes composições de matrizes energéticas de eletricidade, por exemplo, de vários países, assim como análise individual de materiais e seus processos de fabricação, tipos de transporte utilizados e, também, diferentes processos de fabricação. Já a energia embutida é a soma da energia de mineração com a energia de processamento do material. Esta soma resulta em um valor de energia (MJ) por peça. As informações de energia coletadas estão fundamentadas em pesquisas bibliográficas disponíveis em trabalhos como ASHBY ⁽¹⁸⁾ e GUTOWSKI ⁽²⁰⁾. Em países com matriz energética limpa, faz mais sentido usar como unidade metrológica da ACV a pegada de CO₂.

3.2.1.1. METAIS

As informações de energia dos metais expressam a quantidade de energia embutida na mineração dos materiais para a obtenção de 1 kg de material usável e a sua transformação secundária na manufatura. A Tabela 1 mostra essa expressão para diversos tipos de metais, bem como a correspondente emissão de CO₂.

Tabela 1: Pegada de energia e CO₂ na mineração para a obter 1 kg de metais

Material	Massa (kg)	Energia (MJ/kg)	kg de CO ₂
Alumínio	1	220	12
Magnésio	1	375	23,6
Titânio	1	670	41
Cobre	1	71	5,2
Chumbo	1	55	3,5
Zinco	1	13	3,8
Níquel	1	133	8,3
Aço	1	32	2,5
Aço inoxidável	1	81	5,0
Ferro	1	17	1,0
Latão	1	72	2

Fonte: CICERI (2010) ⁽²⁰⁾.

O valor da energia embutida por peça é obtido após somar a energia de mineração com a energia de processamento do material, conforme Tabela 2:

Tabela 2: Energia embutida no processamento de materiais metálicos.

Processo	Energia embutida (MJ/kg de material)
Usinagem	5,3 – 7,5
Fresamento	1,3 – 2,6
Moagem	8,8
Fundição de ferro	19 – 29
Moldagem em areia	11,6 – 15,4
Fusão em molde	14,9
Forjamento	16,3
Acabamento	24
Jato de água (aço)	167 – 238

Fonte: CICERI (2010) ⁽²⁰⁾.

O cálculo de energia embutida no processamento de materiais metálicos está sujeito ao contexto da fabricação, uma vez que, segundo GUTOSWIKI, a precisão deste item varia significativamente devido ao layout da fábrica e dos processos utilizados na manufatura do produto ⁽²⁰⁾.

3.2.1.2. PLÁSTICOS

De maneira análoga ao item 3.2.1.1., a energia embutida em materiais plásticos está relacionada com a soma das energias de extração e processamento. Entretanto, no caso de materiais plásticos considera-se o estágio inicial do refinamento da matéria-prima (Tabela 3), haja vista os processos químicos que podem variar de forma muito ampla, dependendo do tipo de plástico desejado. Embora a matéria-prima (hidrocarboneto) tenha duas possibilidades de entrada no processo (como material ou como combustível), este estudo vai analisar a matéria-prima como entrada de material ⁽²⁰⁾.

Tabela 3: Energia embutida na extração para obtenção de 1 kg de polímero.

Material	Massa (kg)	Energia (MJ/kg)	kg de CO ₂
ABS	1	96	3,4
Poliâmida (PA)	1	128	5,5
Polipropileno (PP)	1	97	2,7
Polietileno (PE)	1	81	2,1
Polycarbonato (PC)	1	110	5,6
PET	1	83	2,3
PVC	1	81	2,4
Poliestireno (PS)	1	92	2,8
PLA	1	53	2,3
Epóxi	1	117	4,4
Poliéster (PES)	1	88	2,9
Borracha	1	66	1,5
Elastômero (EVA)	1	91	3,0

Fonte: ASHBY (2010) ⁽¹⁸⁾.

Para a obtenção da energia de processamento de polímeros, considera-se o mesmo tipo de máquina utilizado por Duran ⁽²⁰⁾, cujo consumo de energia varia entre 12,6 MJ e 19 MJ por kg de material obtido. Além da energia de processamento, faz-se necessário somar os valores energéticos correspondentes na obtenção e manufatura do plástico, considerando ainda a matriz de energia elétrica do país de referência, conforme ilustrado na Tabela 4 a seguir.

Tabela 4: Energia envolvida na injeção de peças plásticas, matriz de energia elétrica da Austrália.

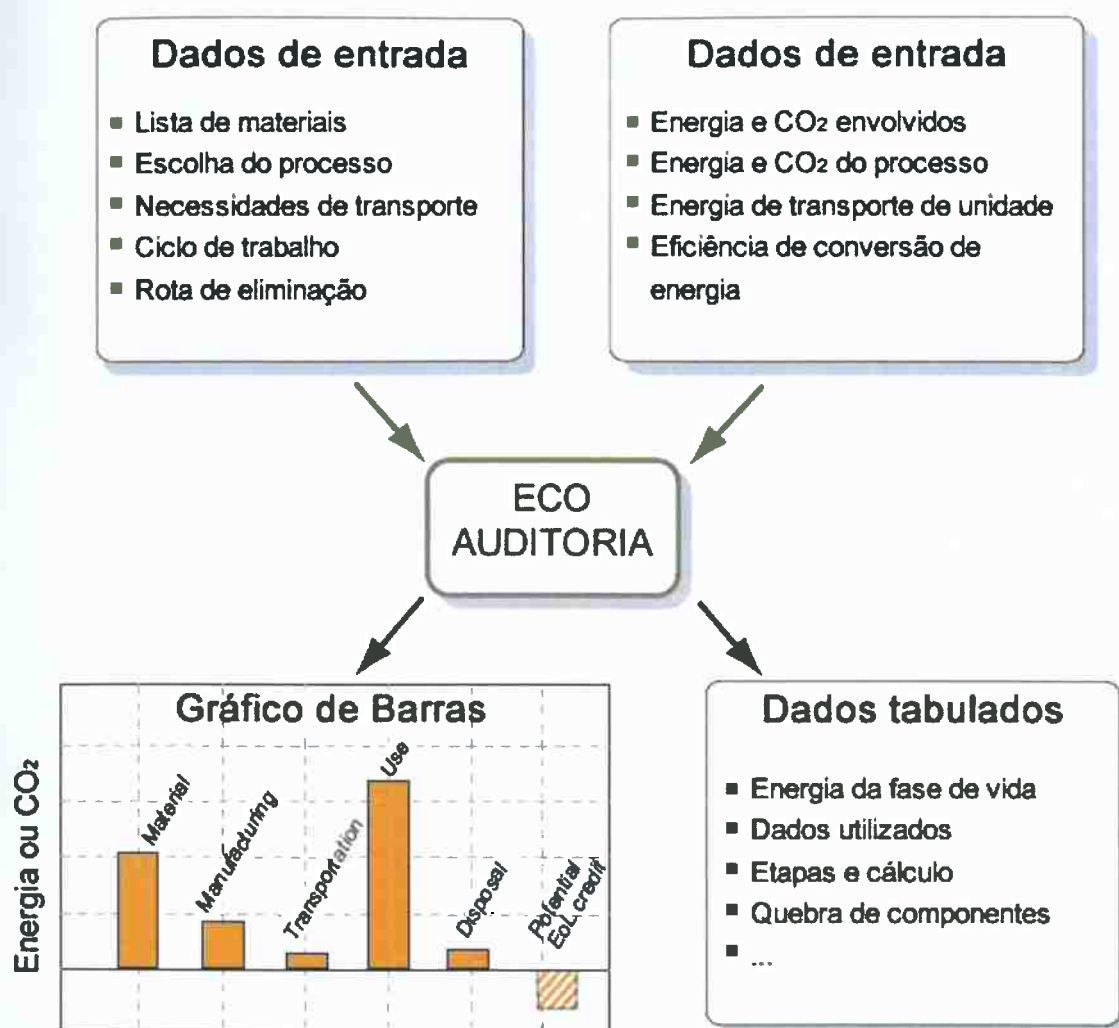
Processo	Fornecimento E (kW/h)	Fornecimento MJ, <i>Austrália</i>	Quant. Peças (hora)	Energia / Peça
Injeção	55	10	40	13,73

Fonte: ASHBY (2010) ⁽¹⁸⁾.

3.2.2. ECO-AUDITORIA

Como visto anteriormente, a ACV estabelece as condições para medir a energia embutida nos materiais que compõem o produto, cuja condição se difere um pouco no caso dos semicondutores. A eco-auditoria, por sua vez, analisa os fluxos energéticos e de CO₂, indo além da energia embutida dos materiais. Ela abrange também a energia de transporte, consumo e descarte final do produto. Sendo assim, a eco-auditoria é uma ferramenta que permite avaliar o produto como um sistema, incluindo a soma da energia que entra e sai. A eco-auditoria identifica qual fase de vida do produto corresponde à maior demanda de energia ou cria a maior carga de CO₂. Ela identifica onde estão os maiores gargalos durante o ciclo. Muitas vezes, uma fase da vida é dominante em termos ecológicos, representando 80% ou mais dos totais de energia e emissão de carbono. Logo, segundo ASHBY, o principal objetivo de uma auditoria ambiental consiste em comparar as fases, permitindo escolher alternativas de solução visando um menor consumo de energia e reduzir a emissão de CO₂. A Figura 4 mostra o procedimento para a eco-auditoria de um produto, cujos dados de entrada definidos pelo usuário são combinados com dados extraídos de bancos de dados da energia envolvida de materiais, processamento de energia, tipo de transporte e eficiência de conversão de energia. A mesma ferramenta pode ser usada para avaliar a pegada de CO₂ ⁽²⁶⁾.

Figura 4: Método de eco-auditoria energética.



Fonte: ASHBY (2010) ⁽²⁶⁾.

As entradas de dados são de dois tipos. O primeiro tipo de entrada de dados abrange a lista de materiais, a escolha do processo, as necessidades de transporte, ciclo de trabalho (os detalhes de energia e intensidade de uso) e rota de descarte, mostrado no canto superior esquerdo da Figura 4. O outro tipo de entrada, que faz parte do banco de dados do software, contém as energias e emissões envolvidas em várias etapas de produção do material primário, de processamento primário e secundário do produto, dos tipos de distâncias de transportes, dos detalhes da fase uso (tipo de conversão de energia, por exemplo energia elétrica ou queima de combustível fóssil em energia cinética, potência dos equipamentos elétricos envolvidos, horas de uso por ano, tipos de combustíveis e etc.), da etapa de descarte (reciclagem, reuso, aterro sanitário) e a análise do fim de vida do produto Ashby ⁽²⁶⁾. As saídas da ACV são a pegada de carbono ou a energia para cada fase da vida, apresentada como gráficos de barras ou em forma de tabela para cada um dos componentes de um produto.

3.3. A PROBLEMÁTICA DA RECICLAGEM DAS CAPSULAS E DO CAFÉ

No Brasil consomem-se 8.000 mil toneladas de cápsulas por ano, e o destino final é geralmente o aterro sanitário ⁽²⁷⁾. Segundo PONTES ⁽²⁷⁾, a reciclagem desse tipo de produto ainda não funciona bem no Brasil. Além da borra do café, a maior parte das cápsulas é feita de diferentes tipos de plástico, alumínio e papel. E a cápsula de material composto dificulta ou quase inviabiliza a reciclagem por causa do custo da separação dos materiais. Atualmente, existem apenas 71 pontos de coletas para reciclagem da Nespresso, maior empresa no segmento de café em cápsulas no país, onde as cápsulas podem ser. O alumínio vai para a indústria metalúrgica, e a borra de café pode virar composto fertilizante para enriquecer solo para agricultura, assim como pode virar biocombustível para ônibus ⁽²⁸⁾.

Segundo pesquisa realizada pela USP, feita pela professora Denise Moreira dos Santos do Programa de Interunidades de Pós-Graduação em Energia da USP, é possível produzir biodiesel a partir do óleo essencial extraído da borra do café. Pelos testes laboratoriais realizados, a partir de um quilo de borra de café é possível extrair 100 ml de óleo, o que geraria cerca de 12 ml de biodiesel. O óleo essencial é extraído da borra de café por meio da utilização de etanol como solvente. Após a extração, o óleo é posto em contato com um catalisador alcalino, que realiza uma reação de transesterificação com a qual se obtém o biodiesel. As características dos ácidos graxos do óleo essencial do café são semelhantes aos da soja, embora estejam presentes em menor quantidade ⁽³⁰⁾.

Uma pesquisa realizada na Universidade de Bath, no Reino Unido, liderada pelo pesquisador Rhodri W. Jenkins, comprovou que funciona o processo de produção de biodiesel a partir de pó de café oriundo de 20 diferentes regiões do mundo, incluindo versões cafeinadas e descafeinadas e vários tipos de cultivares. Não apenas o rendimento foi consistente, como a qualidade do óleo produzido é menos variável do que se esperava. Na média, o óleo produzido a partir das diversas amostras continha entre 44 e 50% de ácido linolênico, entre 35 e 40% de ácido palmítico, entre 7 e 8% de ácido oleico e entre 7 e 8% de ácido esteárico. Os pesquisadores reconhecem que, apesar do potencial da reciclagem, o óleo de café poderia compor apenas uma parcela pequena da demanda por biodiesel - a produção mundial de café é estimada em 9 milhões de toneladas anuais, o que representa um potencial de 1,8 milhão de toneladas de biodiesel. Contudo, a grande vantagem é a possibilidade de sua produção em pequena escala, para alimentar frotas de prefeituras ou entidades que façam o recolhimento dos resíduos de café, apontam eles, segundo JENKINS ⁽²⁴⁾.

Já no que tange às cápsulas de café, a Nestlé atenta-se ao grande volume de resíduo gerado e, a partir da análise do ciclo de vida (ACV) do produto, investe em pesquisa e divulga as alternativas como forma de marketing, tornando o produto

aparentemente mais sustentável e mais popular ⁽⁴⁰⁾. No mundo, a Nespresso recicla 56% de todas as suas cápsulas de cafés vendidas. No Brasil, porém, esses números ainda não são muito animadores. Em 2017, foram apenas 13,3% de cápsulas recicladas, por conta de diversas dificuldades, dentre as quais a principal é a falta de hábito do consumidor brasileiro. A Nespresso está cada vez mais investido em campanhas de criação de valor à reciclagem e inclusive inaugurou um programa de visitas do público ao seu Centro de Reciclagem, localizado em Barueri, São Paulo. Basta somente se inscrever pelo site ou, se preferir, a pessoa pode realizar o tour virtualmente, a partir do site da companhia. O tour contempla toda a cadeia do café e a explicação do maquinário que realiza a separação do pó de café do alumínio ⁽²⁹⁾.

Uma alternativa desenvolvida pela *Braskem*, em parceria com a *Nespresso* é o polietileno *I'm green™* (utilizado na casca da cápsula da *Nespresso*), biopolímero produzido a partir de cana-de-açúcar, a qual absorve CO₂ da atmosfera durante o seu crescimento e contribui assim para a redução das emissões de gases de efeito estufa. Em 2015, a empresa Braskem realizou uma atualização à análise de ciclo de vida (ACV) do polietileno *I'm green™* e o estudo mostrou que, para cada quilograma de polietileno verde utilizado na produção do saco de reciclagem da Nespresso, mais de 4,5 kg de CO₂ deixam de ser emitidos em relação aos sacos de reciclagem que utilizam o polietileno derivado do petróleo ⁽⁴¹⁾.

Na Figura 5 é possível visualizar o ciclo de uma cápsula de alumínio, que é utilizada na atualidade pela Nespresso. O fluxograma resumido retrata a reciclagem da cápsula de alumínio, passando pela coleta, pelo Centro de Reciclagem, pela separação do resíduo do café e do corpo de alumínio, pelo destino do café e do alumínio e pelo encerramento do ciclo.

Figura 5: Representação resumida do ciclo da cápsula de café.



Fonte: Nespresso [36].

4. METODOLOGIA

4.1. CAMBRIDGE ENGINEERING SELETOR (CES)

O software educacional CES EduPack, desenvolvido por pesquisadores da Universidade de Cambridge e pela Granta Design, utiliza uma ampla base de dados e biblioteca de materiais, possibilitando a estudantes realizar projetos de seleção de materiais e processos assim como de análise de ciclo de vida. O CES EduPack foi projetado pela Granta e desenvolvido ao longo dos anos pelos professores David Cebon e Mike Ashby e, atualmente a empresa comercializa vários softwares e bancos de dados especializados para universidades e empresas de ponta ⁽¹³⁾.

4.2. FERRAMENTA DE AUDITORIA AMBIENTAL (*ECO-AUDIT TOOL*)

Dentro do software CES EduPack há a ferramenta *Eco-Audit*, responsável pelas análises de ciclo de vida. Dentro da vasta base de dados da Granta, existem bases de dados ambientais que possibilitam a quantificação energética e de pegada de água ou de CO₂ de todas as etapas de vida de um produto, permitindo identificar a etapa de vida mais crítica do produto, a qual poderá ser melhorado através de *eco-design* de um novo produto ⁽¹³⁾.

A estratégia para realizar o *eco-design* consiste em três etapas. A primeira etapa é usar a ferramenta precisa de *Eco-Audit* e existem diversos níveis de análises, que variam desde uma simples triagem até uma análise de ciclo de vida completa, que requer tempo e dinheiro. A segunda etapa consiste na seleção de uma medida única de impacto ambiental. Pelo Protocolo de Kyoto de 1997, por exemplo, as nações desenvolvidas se comprometeram a reduzir progressivamente a emissão de gás carbônico. Já no Reino Unido, o foco é mais na redução do consumo energético, apesar de esta redução estar direta e indiretamente relacionada ao consumo de CO₂. Já a terceira e última etapa se baseia na diferenciação das contribuições de cada fase da vida de um componente, pois as ações posteriores estarão diretamente dependentes da fase dominante. Caso a fase dominante seja a de produção do material, então, deve-se escolher um material com baixa energia incorporada ou baixa pegada de gás carbônico em sua produção. Mas caso a fase dominante seja a de fim de vida, por exemplo, deve-se escolher um material cuja reciclagem ou reutilização envolva baixo consumo energético e tenha baixa emissão de CO₂, mesmo que sua energia incorporada seja alta ⁽¹³⁾.

4.3. MATERIAIS, MANUFATURA E FINAL DE VIDA

A área destinada à escolha de materiais define o produto por meio de uma “lista de materiais”, com cada linha representando um componente individual, como pode ser observado na Figura 6.

Figura 6: Interface do *Eco-Audit Tool* para fase material, manufatura e fim de vida.

Material, manufacture and end of life						
Qty.	Component name	Material	Recycled content	Mass (kg)	Primary process	End of life
1	Exemplo 1			0		None
1	Exemplo 2			0		None

Fonte: CES, módulo *Eco-Audit Tool* ⁽¹³⁾.

As opções de entrada do CES EduPack, na fase Material, manufatura e fim de vida serão descritas a seguir. A coluna "Qty." indicará a quantidade de componentes individuais em estudo. Já a coluna "Component name" é onde deve ser introduzido o nome de cada componente. O campo "Material" permite a seleção do material do componente, ao exibir uma lista de materiais do banco de dados do software. Depois de selecionados, o CES extrai os dados de propriedades ambientais de cada um dos materiais e processos selecionados do banco de dados do software, que conta com mais de 3 mil materiais de engenharia. A caixa de diálogo "Recycle content" representa o conteúdo de material reciclado usado na confecção do material primário. Um material é classificado como virgem quando não possui nenhum conteúdo reciclado. É possível inserir valor entre 0 e 100, onde 0% simboliza o material virgem, no qual todo material utilizado no componente é produzido diretamente de matérias-primas extraídas da natureza, e 100% simboliza o outro extremo, no qual todo o componente é oriundo de matérias-primas recuperadas. Além dos extremos, o valor inserido indica o nível de material reciclado incorporado no componente ⁽¹³⁾. Embora muitos materiais possam ser reciclados e possuir frações de reciclagem em sua incorporação, os valores indicados na base de dados do CES mostram que alguns materiais não são apropriados para serem reintroduzidos na cadeia logística, isto é, valem mais a pena serem utilizados em sua forma virgem. Segundo o próprio manual do *Granta Design*, os cálculos utilizados para se determinar a carga ambiental de um componente com fração reciclada são os seguintes:

$$E_{material} = \left(\frac{100 - R_f}{100} \right) * E_m + \left(\frac{R_f}{100} \right) * E_{rc} \quad \left[\frac{MJ}{kg} \right] \quad (1)$$

Onde: E_m = Energia incorporada para produção primária (MJ/kg); R_f = Fração de material reciclado; e E_{rc} = Energia incorporada para reciclagem do material (MJ/kg).

$$CO_{2\ material} = \left(\frac{100 - R_f}{100} \right) * CO_{2m} + \left(\frac{R_f}{100} \right) * CO_{2rc} \quad \left[\frac{kg}{kg} \right] \quad (2)$$

Onde: CO_{2m} = Pegada de gás carbônico para produção primária (kg/kg); R_f = Fração de material reciclado; e CO_{2rc} = Pegada de gás carbônico para reciclagem do material (kg/kg).

O campo do menu “*Primary process*” representa os processos de manufatura primária disponíveis para cada um dos materiais selecionados. As informações associadas a este campo são extraídas do banco de dados do software. A Tabela 5 resume uma lista de tipos de materiais e seus respectivos processos primários de fabricação.

Tabela 5: Tabela de materiais e processos primários disponíveis no CES EduPack.

Material	Processo
Metais	Fundição
	Extrusão e laminação em rolos
	Laminação
	Trefilação
	Forjamento
	Metalurgia do pó
	Vaporização
Polímeros	Moldagem Extrusão
Cerâmicas técnicas	Valor incluso na fase material
Cerâmicas não técnicas	Valor incluso na fase material
Vidros	Moldagem de vidro
Compósitos	Fundição
	Moldagem por Autoclave
	Trefilação
	Moldagem por compressão
	Spray por resina
	Moldagem de transferência de resina (RTM)
Materiais naturais (papel)	Valor incluso na fase material
Componentes elétricos	Valor incluso na fase material

Fonte: Base de dados CES EduPack ⁽¹³⁾.

Para algumas classes de materiais, tais como cerâmicas, materiais naturais e componentes elétricos, a energia associada ao processo de manufatura primária está incluída no valor de produção da matéria-prima. Para estes materiais, a opção “*Include in material value*” é exibida na lista de seleção do campo “*Primary process*” ⁽¹³⁾. Por fim, a coluna “*End of Life*” indica as opções viáveis para o descarte de cada componente do produto no final de sua vida. Existem sete opções para “*End of Life*”, cuja aplicabilidade será descrita na Tabela 6. A opção “*Landfill*” está relacionada ao destino para aterros sanitários; “*Recycle*” (reciclar) ou “*Downcycle*” (reaproveitar o produto em um novo uso) tem os valores de crédito de energia ou de emissão de CO₂ determinadas pelo banco de dados do software. A opção “*Combust*” refere-se à queima após o descarte do material; já as demais opções “*Re-manufacture*”, “*Reuse*” e “*None*” são adicionadas a todos os materiais, mas não são especificadas no CES EduPack ⁽¹⁹⁾.

Tabela 6: Aplicabilidade das opções de “End of Life” e descarte nos materiais.

Opções de “End of life”	Aplicabilidade nos materiais
<i>Landfill</i>	A todos os materiais não tóxicos
<i>Combust</i>	Todos os materiais com bases orgânicas com calor de combustão > 5 MJ/kg
<i>Downcycle</i>	Todos
<i>Recycle</i>	Todos: metais / vidros / termoplásticos
	(Todas cerâmicas / termo fixos / elastômeros / naturais orgânicos / naturais inorgânicos materiais e todas as fibras reforçadas são sinalizadas como não recicláveis)
<i>Re-manufacture</i>	Todos
<i>Reuse</i>	Todos
<i>None</i>	Todos

Fonte: Base de dados CES EduPack ⁽¹⁹⁾.

4.4. TRANSPORTE

A área destinada ao transporte, logo após a definição de materiais, manufatura e fim de vida, está relacionada com a logística de transportes desde a extração da matéria-prima até a fabricação e descarte do produto. Como pode ser observada na Figura 7, cada linha no campo de transportes do CES define uma etapa da viagem, sendo que não há limites para o número de fases a ser adicionado. Para cada fase adicionada, três parâmetros devem ser definidos: o nome do transporte ou percurso, o tipo de transporte e a distância percorrida. O tipo de transporte determinará o gasto energético e a emissão de CO₂ do mesmo, a qual será detalhada na Tabela 7 ⁽¹³⁾.

No caso das cápsulas de café, não se mudou o país do fabricante para que pudesse ser feita uma comparação entre os diferentes produtos, com foco mais amplo nas diferentes escolhas de materiais e não nos requisitos logísticos de cada produto. A etapa de transporte, portanto, consistirá de uma etapa de transporte por 15.000 km em um navio (supondo o transporte da Suíça, maior fabricante de cápsulas de café do mundo, onde estão localizadas as fábricas da Nespresso, para uma outra locação), 150 km (transporte do porto para o centro de distribuição) em um caminhão de 14 toneladas e mais 15 km em um veículo urbano de carga (do centro de distribuição para o revendedor). Embora os números sejam grandes, essa fase será praticamente desprezível, conforme veremos mais adiante. As entradas de dados de transporte podem ser visualizadas na Figura 8.

Figura 7: : Interface do CES no módulo *Eco Audit Tool* para a fase transporte.

☒ Product information ?
☒ Material, manufacture and end of life ?
☒ Transport ?

Name	Transport type	Distance (km)
	▼ 0 Sea freight River/canal freight Rail freight 32 tonne truck 14 tonne truck Light goods vehicle Air freight - long haul Air freight - short haul Helicopter	

☒ Use ?
☒ Report ?

Fonte: CES EduPack, módulo *Eco-Audit Tool* ⁽¹³⁾.

Tabela 7: Pegada ambiental para os tipos de transportes do CES EduPack.

Transporte	Energia do transporte (MJ/tonelada/km)	Pegada de CO ₂ (kg/MJ)
Navio cargueiro	0.16	0.071
Balsas em canais e rios	0.27	0.071
Transporte ferroviário	0.31	0.071
Caminhão de 32 toneladas	0.46	0.071
Caminhão de 14 toneladas	0.85	0.071
Veículos econômicos	1.4	0.071
Frete aéreo - longa distância	8.3	0.067
Frete aéreo - curta distância	15	0.067
Helicóptero	50	0.067

Fonte: Base de dados CES EduPack ⁽¹³⁾.

Figura 8: Entrada de dados do CES no módulo *Eco Audit Tool* para a fase transporte.

Transport ?		
Name	Transport type	Distance (km)
Navio da Suíça para Brasil	Ocean freight	1,5e+04
Caminhão do porto para distribuição	14 tonne (2 axle) truck	150
Transporte urbano para revendedor	Light goods vehicle	15

Fonte: CES, módulo *Eco-Audit Tool*.

4.5. USO, DESCARTE E POTENCIAL DE FIM DE VIDA

A última entrada de dados necessários para a eco auditoria é a fase de “Use”, a qual se refere às pegadas energética e de CO₂ relativas à utilização do material. O uso do material depende diretamente de parâmetros como quantidade de dias de utilização no ano, país de origem e tipos de combustíveis consumidos em seu funcionamento ⁽¹⁹⁾. A entrada de dados desta etapa pode ser analisada na Figura 9:

Figura 9: Interface do CES no módulo *Eco Audit Tool* para a fase Uso.

Use ?

Product life: 1 Years

Country of use: World

Static mode

☐ Product uses the following energy:

Energy input and output: Electric to thermal

Power rating: 0 W

Usage: 0 days per year

Usage: 0 hours per day

Mobile mode

☐ Product is part of or carried in a vehicle:

Fuel and mobility type: Diesel - ocean shipping

Usage: 0 days per year

Distance: 0 km per day

Fonte: CES, módulo *Eco-Audit Tool* ⁽¹⁹⁾.

Como este estudo se baseia em embalagens da indústria cafeeira, estes valores de utilização serão iguais para todas as cápsulas, considerando que todas utilizam a mesma máquina de café. Para o estudo, adotou-se a máquina Nespresso Essenza Mini (Figura 11), de potência nominal de 1450 W ⁽⁹⁾, a qual é compatível com todos os tipos de cápsulas em questão, segundo informações obtidas no próprio site da Nespresso. Considera-se, ainda, um consumo diário de 2 cápsulas de café (40 ml de água por café, uso por aproximadamente 36 segundos, ou 0,01 hora), ao longo dos 365 dias do ano, durante a vida útil da máquina de 6 anos (consumo energético de 12,7 Wh por café). As entradas de dados podem ser visualizadas na Figura 10.

Figura 10: Entrada de dados do CES no módulo *Eco Audit Tool* para a fase Uso.

⬆ Use ?

Product life: 6 Years

Country of use: Brazil

Static mode

☒ Product uses the following energy:

Energy input and output: Electric to thermal

Power rating: 1450 W

Usage: 365 days per year

Usage: 0,01 hours per day

Fonte: CES, módulo *Eco-Audit Tool*.

Figura 11: Máquina Nespresso Essenza Mini.



Fonte: Nespresso ⁽⁹⁾.

O descarte do produto e o potencial do fim de vida (EoL) estão diretamente relacionados a um ganho ou consumo energético, que depende do tipo do material, da massa de material e da proporção de reciclado incorporado no material, e que se apresenta tabelado na própria base de dados do CES EduPack ⁽¹⁹⁾.

4.6. CÁPSULAS UTILIZADAS

Neste trabalho foram estudados quatro diferentes tipos de cápsulas de café:

- Aço inoxidável (cápsula de uso contínuo, sem descarte),
- Alumínio,
- PP (polipropileno),
- PLA (poliácido láctico).

As informações foram obtidas por meio de pesquisas bibliográficas (materiais de domínio científico) e pesquisas documentais (documentos e informações variadas sem tratamento científico). Ademais, também foram obtidas especificações técnicas das cápsulas de café disponíveis para consulta tanto nos sites e catálogos dos fabricantes das cápsulas, quanto em artigos e publicações científicas especializadas no tema. A primeira cápsula é a de aço inoxidável, que está emergindo no mercado recentemente. A Associação Brasileira da Indústria de Café (ABIC) prevê que serão consumidas 16 mil toneladas de café por meio das monodoses em 2019. Com isso, cresce a busca por alternativas mais sustentáveis e soluções mais “verdes”, inclusive vindas das próprias marcas, que estão trabalhando duro para estruturar um ciclo de reciclagem 100% eficiente ⁽¹⁾.

Segundo pesquisa da ABIC, é possível economizar cerca de R\$ 1 mil por ano, considerando uma pessoa que consome até 2 cafezinhos por dia, ao substituir a cápsula convencional pela de aço inoxidável que não é descartável, que pode ser visualizada pelas Figuras 12 e 13 ⁽¹⁾. A segunda cápsula (Al) é a mais comum, sem embalagem, sem envoltório, com caixa de papelão externa para conjuntos de várias unidades. A terceira cápsula é a de polipropileno (PP). Com embalagem para uma cápsula composta por uma composição de PE, Al e PET, sem envoltório, com caixa de papelão externa para conjuntos de várias unidades. Já a quarta cápsula é a de poliácido láctico (PLA), um polímero constituído por moléculas de ácido láctico, com propriedades semelhantes às do tereftalato de polietileno (PET), o qual é utilizado para fabricar envases, mas que também é biodegradável e degrada-se facilmente em água e dióxido de carbono – somado à um filtro de amido. Sem embalagem, com envoltório para dez cápsulas composto por uma composição de PP, PET, papel e papelão, com caixa de papelão externa para conjuntos de várias unidades.

A composição das cápsulas, com seus respectivos compartimentos, materiais e gramatura foram resumidas na Tabela 8. Estas informações serão as mesmas utilizadas na entrada de dados da fase Material. A estrutura geral de uma cápsula de café pode ser visualizada na Figura 14:

Figura 12: Composição de uma cápsula de aço inoxidável.



Fonte: WayCap, Refillable Capsules & Coffees ⁽³³⁾.

Figura 13: Cápsula de aço inoxidável.



Fonte: WayCap, Refillable Capsules & Coffees ⁽³³⁾.

Tabela 8: composição material das cápsulas.

Produto		Alumínio		PP		PLA		Aço inoxidável	
		Material	Massa da cápsula (g)	Material	Massa da cápsula (g)	Material	Massa da cápsula (g)	Material	Massa da cápsula (g)
Cápsula	Casca	Al	0,81	PP	1,45	PLA	4,3	Aço Inox	50
	Membrana	Al	0,14	Al	0,052	PE	0,03		
				PE	0,012	Al	0,0001		
	Filtro	Incluído na casca e na membrana					Papel		

Fonte: ABIC ⁽¹⁾, Nespresso ⁽⁹⁾, PONTES ⁽²⁷⁾, GoldExpresso ⁽³³⁾.

Figura 14: Estrutura geral de uma cápsula de café.



Fonte: Nespresso ⁽⁹⁾.

O impacto causado para se entregar um único copo de café a um consumidor pode ser resumido pela Figura 15. Esta imagem representa um fluxograma simplificado, incluindo as principais etapas, desde a produção até o fim de vida da cápsula ⁽³⁶⁾.

Figura 15: Fluxograma simplificado do consumo de um copo de café.



Fonte: Nespresso ⁽³⁶⁾.

Ademais, para as embalagens é importante saber o método de processamento utilizado. Sabe-se que as embalagens poliméricas em estudo são todas feitas a partir da termomoldagem ou por extrusão (membrana e filtro polimérico). Já para os filtros

metálicos, o método de processamento mais utilizado é a laminação. No geral, independentemente do tipo de cápsula, todas passam pelo mesmo processo de preenchimento. Um braço mecânico pega um determinado número de cápsulas, colocando-as num tapete metálico, onde lhes são introduzidos dois filtros, um no fundo e outro na tampa das cápsulas, cujo objetivo é evitar as borras de café, quando o consumidor as utilizar ⁽³⁸⁾. Em seguida são colocadas aproximadamente 6 gramas de café em cada uma das cápsulas (Figura 16), a partir de dois depósitos de café, os quais se situam por cima da máquina de enchimento das cápsulas, submetendo-as a um sistema de pesagem que garante que todas tenham o peso ideal ⁽³⁹⁾.

Figura 16: Processo de enchimento de café nas cápsulas.



Fonte: Nespresso ⁽³⁹⁾.

Por fim, tampas seladoras são fixadas sobre cápsulas. Um outro braço mecânico separa as peças em pequenos grupos e as posiciona em fila para entrarem nas embalagens, rotuladas com as informações legais (número de lote, dia de produção e data de validade) de onde serão vendidas ⁽⁴⁰⁾. Resumindo, os processos de produção e enchimento são majoritariamente mecânicos, apesar de existir a necessidade da presença de trabalhadores para assegurar o bom funcionamento dos processos ⁽³⁹⁾. Por conta das recentes evoluções tecnológicas, o controle e a verificação dos processos podem ser efetuados a partir de um sistema de câmaras, de análise e detecção de erros, que funciona através da sensibilidade luminosa. Existe ainda o software de visão artificial, Halcon, que detecta as cápsulas com defeito, retirando-as do processo através de acionadores pneumáticos, que utilizam vácuo para sugar as cápsulas defeituosas ⁽⁴⁰⁾. Os processos de obtenção dos diferentes tipos de cápsulas serão melhor descritos a seguir.

4.6.1. CÁPSULA DE ALUMÍNIO

As cápsulas constituídas por material metálico são fabricadas mais facilmente do que as cápsulas em plástico, sendo muito pouco espessas, mas, também, difíceis de combinar com o material de filtragem adequado, podendo ter o inconveniente de reagir com o café moído, alterando as suas propriedades e, conseqüentemente, o seu aroma - desenvolvimento rápido de ranço ⁽³⁶⁾. Atualmente o material mais utilizado na fabricação de cápsulas de café é o alumínio, cujas características gerais podem ser resumidas na Tabela 9.

Tabela 9: Características gerais do Alumínio.

CARACTERÍSTICAS GERAIS DO ALUMÍNIO	
Ponto de fusão	O alumínio puro possui um ponto de fusão de 660°C. Porém, as ligas de alumínio, devido à presença de outros metais, possuem, em geral, um ponto de fusão mais baixo que o alumínio puro.
Densidade	A densidade do alumínio é de cerca de 2,70 g/cm ³ .
Características mecânicas	O alumínio comercialmente puro tem uma resistência à tração de, aproximadamente, 90 MPa. Porém, a sua resistência pode ser aumentada pelo trabalho a frio do alumínio ou a partir da adição de outros metais, constituindo ligas metálicas. O alumínio e algumas das suas ligas perdem parte da sua resistência a elevadas temperaturas, enquanto outras conservam uma boa resistência a temperaturas entre os 200°C e os 260°C.
Resistência à corrosão	Quando o alumínio líquido é exposto ao meio exterior, forma-se uma fina e invisível camada de óxido, que protege o metal de oxidações posteriores, conferindo-lhe uma elevada resistência à corrosão.
Condutividade térmica	O alumínio puro possui uma condutividade térmica (k), aproximadamente igual a 0,53 W/(mK). A alta condutividade térmica do alumínio é um fator que influencia, de forma positiva, o seu uso na indústria de alimentos e de produtos químicos.
Refletividade	O alumínio reflete cerca de 80% da radiação nele incidente, permitindo a manutenção da sua temperatura.
Características de barreira	O alumínio reflete a radiação solar, é impermeável à ação da humidade e do oxigénio, pelo que este metal é muito utilizado no fabrico de embalagens.
Reciclagem	O alumínio é "infinitamente reciclável" e nunca perde as suas propriedades físico-químicas, pelo que o seu uso no fabrico de cápsulas para café, por exemplo, se torna bastante rentável.

Fonte: SMITH, "Princípios de Ciência e Engenharia dos Materiais", 1998 ⁽³²⁾.

Entretanto, o alumínio utilizado nas cápsulas de café se encontra na forma de ligas, as quais se dividem em dois grupos (SMITH) ⁽³²⁾:

- **Ligas para trabalho mecânico e tratamento térmico:** este tipo de liga pode ser endurecido recorrendo a tratamentos térmicos, como a precipitação, sendo que os principais grupos de ligas de alumínio com tratamento térmico são os 2xxx, 6xxx e 7xxx;
- **Ligas para trabalho mecânico e sem tratamento térmico:** este tipo de liga não pode ser endurecido recorrendo a tratamentos térmicos como a precipitação, mas somente através de deformação, sendo que os principais grupos de ligas de alumínio sem tratamento térmico são os 1xxx, 3xxx e 5xxx.

A liga de alumínio específica para as cápsulas de café é o alumínio 1100, cujas características estão detalhadas na Tabela 10. Esta liga é uma liga 1xxx, que apresenta no mínimo 99% de alumínio, aos quais é adicionado 0.12% de cobre de forma a aumentar a resistência mecânica. O ferro e o silício constituem as principais impurezas desta liga. Este material é escolhido como constituinte para uma cápsula de café devido à sua leveza, condutividade térmica, resistência à corrosão e baixo ponto de fusão. Além destes aspetos, esta liga de alumínio consegue facilmente conservar e proteger o café do ar e da luz, sendo ainda infinitamente reciclável. Portanto, as cápsulas tornam-se passíveis de serem recicladas para ser em futuramente reutilizadas noutros produtos. ⁽⁵⁾. Em resumo, o alumínio é um dos melhores materiais atualmente disponíveis para produção de cápsulas para café, uma vez que assegura uma manutenção mais eficaz das propriedades do café (aroma e sabor), protegendo-o do contato direto com o oxigênio e da luz solar. Este metal é, ainda, “infinitamente reciclável” e bastante leve ⁽³²⁾. “A reciclagem de alumínio produz apenas 5% das emissões de carbono quando comparada com a obtenção desta matéria-prima. Pelo fato de ser leve, a utilização de alumínio permite também poupanças em termos de transporte e ao nível ambiental quando comparado com outros materiais” ⁽³²⁾. Ademais, as cápsulas de alumínio não são prejudiciais à saúde, pois são revestidas por uma película que evita o contato direto do metal com o café moído. No que tange à produção, as cápsulas de alumínio sofrem apenas prensagem (Figura 17), de modo a adquirirem o formato desejado, sendo então preenchidas com o café moído e, finalmente, hermeticamente seladas com outra camada de alumínio, impedindo qualquer contato direto do café com o ar e a luz.

Tabela 10: características gerais da Liga de Alumínio 1100.

Liga	Composição Química	Estado	Limite de escoamento (MPa)	Alongamento (%)	Aplicações Típicas
Alumínio 1100	99,0 Al / 0.12Cu	Recozido (-O)	24 (média)	25%	Chapa fina para trabalho de alumínio, varões
		Meio-endurecido (-H14)	97 (média)	4%	

Fonte: SMITH, “Princípios de Ciência e Engenharia dos Materiais”, 1998 ⁽³²⁾.

Figura 17: Prensagem de cápsulas de alumínio.



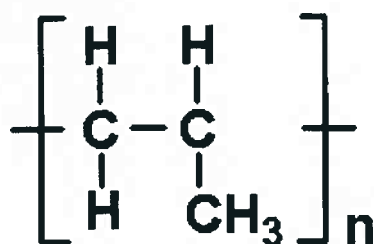
Fonte: Nespresso ⁽³⁷⁾.

Segundo artigo publicado pelo pesquisador Amorós Alberto ⁽³⁷⁾, a prensagem é a operação de moldagem baseada na compactação de um pó granulado (massa) contido no interior de uma matriz rígida ou de um molde flexível, por meio da aplicação de pressão. A operação compreende três etapas ou fases: preenchimento da cavidade do molde, compactação da massa e extração da peça.

4.6.2. CÁPSULA DE POLIPROPILENO

O polipropileno é um dos termoplásticos (tipo de plástico que pode ser moldado recorrendo, apenas, ao seu aquecimento) mais comercializados atualmente, pois é barato, por ser fabricado a partir de matérias-primas petroquímicas (derivadas de petróleo) de custo reduzido ⁽³²⁾. De acordo com SMITH, este termoplástico é um polímero derivado do etileno, estando a sua unidade química estrutural de repetição, a temperaturas compreendidas entre os 165°C e os 177°C, representado na Figura 18.

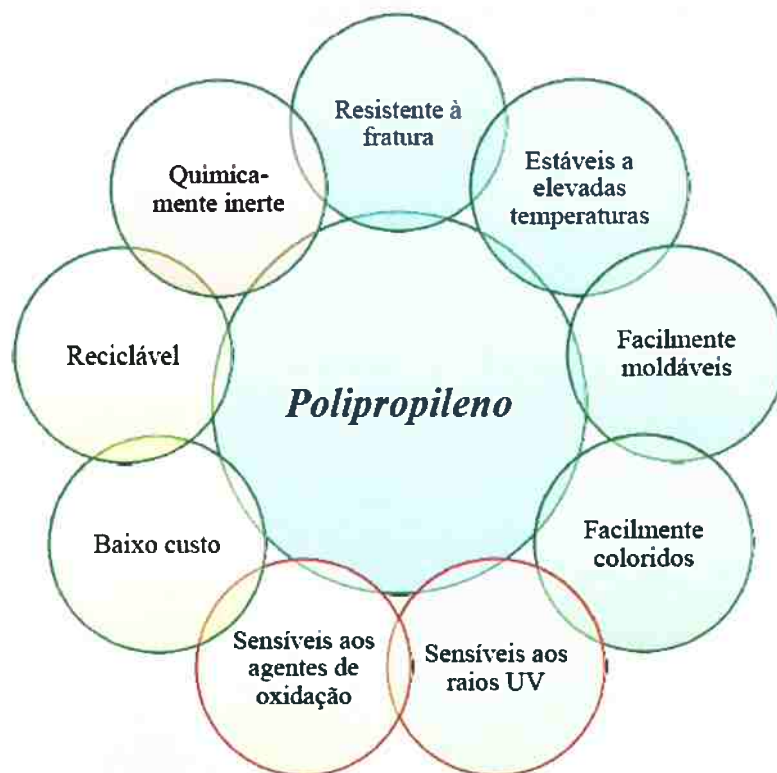
Figura 18: Unidade química estrutural de repetição do polipropileno, de 165 e 177°C.



Fonte: Tudo sobre Plásticos ⁽³⁴⁾.

Ainda segundo SMITH, tendo em consideração a unidade química estrutural do polipropileno, conclui-se que o grupo metil - CH₃ -, da cadeia principal é capaz de restringir “a rotação das cadeias, originando um material mais resistente mecanicamente, mas menos flexível”. Desta forma, como apresenta baixa densidade (0,900 g/cm³ a 0,910 g/cm³), um risco mínimo de fratura, sendo quimicamente inerte e resistente à umidade e ao calor, reciclável e de baixo custo, (Figura 19), o polipropileno é muito usado na produção de cápsulas para café, pois garante a frescura dos aromas e sabores durante, pelo menos, 12 meses ⁽³²⁾. Contudo, este polímero apresenta uma sensibilidade considerável aos raios ultravioleta e aos agentes de oxidação, degradando-se mais facilmente ⁽³⁴⁾.

Figura 19: Síntese das propriedades gerais do polipropileno.



Fonte: Tudo sobre Plásticos ⁽³⁴⁾.

No que tange à produção, por meio de tubos ligados às máquinas de moldes, é injetado plástico quente que preenche as ranhuras vazias dos moldes. Quando estes abrem ao meio, o plástico já adquiriu a forma pretendida para as cápsulas, caindo para um tapete rolante que transporta as cápsulas e as respectivas tampas para um ambiente de arrefecimento do plástico. Após estas etapas, inicia-se a parte de detecção de inconformidades nas peças, as quais são direcionadas a outros tapetes rolantes, com pequenas aberturas laterais, cuja função é sugar por ar a peça imperfeita detectada pelos computadores, fazendo-a cair numa caixa específica. As cápsulas e as tampas que estiverem em perfeitas condições são armazenadas seguem o fluxo e são abertas e despejadas em um recipiente ligado a uma máquina de enchimento, em forma de U, capaz de encher com café, em média, 36 mil cápsulas por hora ⁽⁴⁰⁾.

Além da injeção, é também possível a produção desta cápsula via termoformação, de forma semelhante ao processo de prensagem da cápsula de alumínio, descrito no item anterior. A folha de polipropileno é aquecida a uma temperatura próxima da de fusão, sendo em seguida forçada a um molde, por meio de aplicação de uma pressão (pressão mecânica para moldes fechados ou ar comprimido para moldes abertos). Após o arrefecimento, abre-se o molde e extrai-se a cápsula ⁽⁴⁰⁾. Resumidamente, o rolo de polipropileno é inserido na máquina, passando por etapas de aquecimento até o molde de extrusão. As cápsulas passam pela etapa de controle de qualidade e, as em perfeitas condições, são destinadas ao enchimento e posterior selamento com um filtro, no módulo de vedação. Por fim são destinadas à prensagem para cortar e separar as cápsulas, enquanto o resíduo é separado em outro módulo ⁽⁴⁰⁾.

4.6.3. CÁPSULA DE POLIÁCIDO LÁCTICO

O PLA (também chamado de PDLA, PLLA), ou políácido láctico, é um polímero sintético termoplástico que vem substituindo os plásticos convencionais em diversas aplicações. Ele pode ser usado em inúmeras embalagens alimentícias, embalagens cosméticas, sacolas plásticas, garrafas, canetas, vidros, tampas, talheres, frascos, copos, bandejas, dispositivos médicos, entre outros, incluindo cápsulas de café ⁽⁴⁴⁾. No processo de produção do PLA, as bactérias produzem o ácido láctico por meio do processo de fermentação de vegetais ricos em amido, como a beterraba, o milho e a mandioca, ou seja, é feito utilizando fontes renováveis ⁽⁴⁴⁾. O plástico PLA possui características muito vantajosas. Além de ser um plástico compostável, é também biodegradável, reciclável mecânica e quimicamente, biocompatível e bioabsorvível. Em comparação aos plásticos convencionais, tais como o poliestireno (PS) e polietileno (PE), que demoram de 500 a 1000 anos para se degradarem, o PLA ganha em disparada, pois sua degradação leva de seis meses a dois anos para acontecer. E quando é descartado corretamente, transforma-se em substâncias inofensivas porque é facilmente degradado pela água ⁽⁴⁴⁾.

Quando em pequenas quantidades do PLA passam da embalagem para os alimentos e acabam indo parar no organismo, não trazem risco de danos à saúde, pois ele se converte em ácido láctico, que é uma substância alimentar segura e naturalmente eliminada pelo corpo. Infelizmente, a maior parte do resíduo brasileiro acaba indo parar em aterros e lixões, onde não há garantias de que o material se biodegrade inteiramente. E pior, normalmente as condições dos lixões e aterros faz com que a degradação seja anaeróbia, ou seja, com baixa concentração de oxigênio, fazendo com que haja liberação de gás metano, um dos gases mais problemáticos para o desequilíbrio do efeito estufa. Outra inviabilidade é que o custo de produção dos produtos de PLA ainda é elevado, o que torna o produto um pouco mais caro que os convencionais ⁽⁴⁴⁾.

Quanto ao papel de filtro componente desta cápsula, material apresenta uma espessura de aproximadamente 20 microns. Quanto às suas características, o papel de filtro tem de ser forte o suficiente para não rasgar durante o processo de prensagem. Ademais, este material apresenta uma boa resistência ao calor e a químicos e é completamente biodegradável. Tal como o alumínio e polipropileno, o papel de filtro é reciclável, podendo ser depositado num qualquer ecoponto ⁽⁹⁾. Quanto ao processo de fabricação das cápsulas de PLA, é possível resumi-lo em 4 etapas. A primeira delas é a compressão do papel do filtro, a segunda é a inserção de café moído (enchimento), a terceira é a selagem com a segunda camada de filtro e por fim, o embalamento e comercialização ⁽⁴⁵⁾.

4.6.4. CÁPSULA DE AÇO INOXIDÁVEL

Diante da necessidade da diminuição de produção de resíduos das cápsulas e da oportunidade de surgir uma nova frente no mercado de monodoses de café, materiais reutilizáveis passaram a ser pesquisados para este mercado. Dentre eles, o aço inoxidável. Além de resolver o problema da geração de resíduo, elas também são muito econômicas, pois reduzem o custo do café expresso de uma média de R\$ 2,50 para R\$ 0,40, considerando um café de alta qualidade, uma vez que uma cápsula de aço inoxidável pode substituir a utilização de 1000 cápsulas convencionais. Considerando que cada cápsula possui aproximadamente 6 gramas de café e custa R\$ 2,50, o quilograma de café custaria R\$ 416,67 ⁽⁴⁶⁾.

O aço inoxidável consiste na liga de ferro e cromo e, em sua composição, ainda pode existir níquel e molibdênio, entre outros elementos. Esta composição garante qualidade superior aos aços comuns, possuindo uma grande resistência à oxidação atmosférica. A fundição de aço inoxidável tem um papel importante no mercado atual, onde a matéria prima pode ser utilizada tanto no setor industrial quanto para fins domésticos ⁽⁴⁷⁾. O aço inoxidável contém, geralmente, em torno de 12% de cromo e isso o torna resistente à corrosão, que é sua principal característica e diferencial. Essa porcentagem de cromo forma uma película de óxido de cromo sobre o aço que se torna, então, impermeável e insolúvel, ótima para a aplicação nas cápsulas de café ⁽⁴⁸⁾.

Além de ser inoxidável, insolúvel e impermeável, o aço inoxidável é resistente a altas temperaturas, é bonito, moderno, permite acabamentos variados e diferentes formas por ser moldável com facilidade e possibilita uma fácil limpeza. Por estas características, tornou-se uma opção de sucesso para as cápsulas de café, uma vez que pode ser reutilizado quantas vezes quiser ⁽⁴⁸⁾.

Segundo a TOSTIO, empresa brasileira do segmento de cápsulas de café de aço inoxidável, os principais aços utilizados nas cápsulas são o 304 e o 316L ⁽⁴⁸⁾. Portanto, foi selecionado o aço 316L (0,03C / 2,00Mn / 0,045P / 0,03S / 1,00Si / 17,0Cr / 12,00Ni / 2,50Mo) para realização da ACV ⁽⁴⁹⁾. O aumento no níquel traz maior ductilidade, resistência mecânica ao quente, soldabilidade e aumenta a resistência à corrosão. O aumento no molibdênio traz maior resistência à corrosão por via úmida ⁽⁵⁰⁾.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nesta parte do trabalho constam os primeiros resultados experimentais de uma análise de ciclo de vida para uma embalagem de uma cápsula de café. Para tais resultados, foi utilizado o software CES EduPack 2015, que contempla uma vasta biblioteca de materiais, dando suporte à área de Engenharia de Materiais. Por meio deste software é possível analisar as etapas mais cruciais em questão de pegada energética e de CO₂ durante a produção, utilização e destino final do produto. E para uma indústria cafeeira, além das propriedades geométricas, o preço também pode oscilar para melhorar parâmetros tais como resistência da embalagem, condutividade térmica, limite de escoamento e pegada energética ou de CO₂. Mas deve-se ter em mente que o consumidor que paga o custo da embalagem, então, para a empresa controlar uma maior parcela de mercado, seus preços devem ser baixos e, por sua vez, o custo da embalagem deve também ser baixo ⁽¹⁰⁾.

5.1. ANÁLISE DE CICLO DE VIDA DAS CÁPSULAS

5.1.1. INVENTÁRIO DOS MATERIAIS

O primeiro passo para se realizar uma Análise de Ciclo de Vida (ACV) é o detalhamento do inventário das cápsulas em estudo. Deve-se considerar a matéria prima da casca, membrana, filtro e embalagem e suas respectivas massas, processamentos e deposição. Com o auxílio das áreas de *Supply Chain* e P&D da Nespresso e das pesquisas bibliográficas realizadas, foram obtidas informações das composições das cápsulas, descritas nas Tabelas 11 a 14. Nas Figuras 20 e 21 pode-se visualizar o filtro e as membranas que compõem algumas cápsulas.

Tabela 11: Lista de componentes e materiais para a cápsula de alumínio

Componente	Material	Massa (g)
Casca	Alumínio	0,81
Membrana	Alumínio	0,14
Total		0,95

Fonte: Nespresso ⁽⁹⁾.

Tabela 12: Lista de componentes e materiais para a cápsula de polipropileno.

Componente	Material	Massa (g)
Casca + Filtro	Polipropileno	1,45
Membrana	Alumínio	0,052
Membrana	Polietileno de Alta Densidade	0,012
Total		1,514

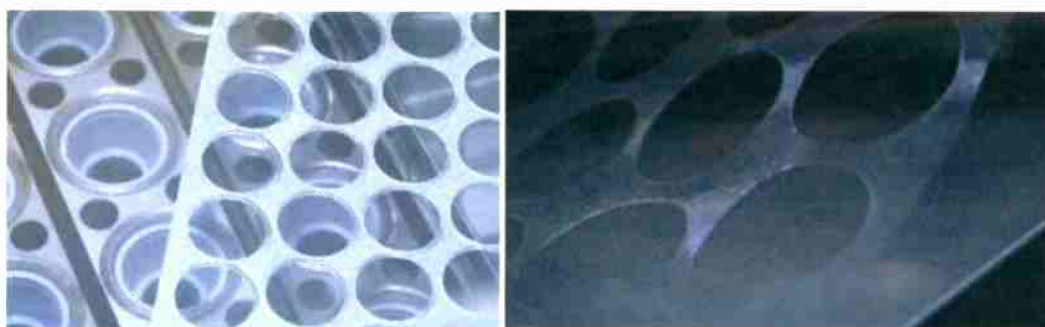
Fonte: Nespresso ⁽⁹⁾.

Figura 20: Filtro de polipropileno que se situa na base da cápsula



Fonte: Dolce Gusto ⁽³⁶⁾.

Figura 21: Membrana de alumínio e de polietileno, da esquerda para a direita.



Fonte: Dolce Gusto ⁽³⁶⁾.

Tabela 13: Lista de componentes e materiais para cápsula de PLA.

Componente	Material	Massa (g)
Casca	Poliácido Láctico	4,3
Membrana	Alumínio	0,0001
Membrana	Polietileno de Alta Densidade	0,03
Filtro	Papel	0,05
Total		4,3801

Fonte: Nespresso ⁽⁹⁾.

Tabela 144: Lista de componentes e materiais para a cápsula de aço inoxidável.

Componente	Material	Massa (g)
Cápsula	Aço Inoxidável 316 L	50,0
Total		50,0

Fonte: Nespresso ⁽⁹⁾.

É possível então, após levantamento do inventário das embalagens, da utilização e da cadeia logística de suas matérias primas, descobrir a fase de maior pegada energética e de CO₂ das embalagens em estudo por meio do Eco-Audit.

5.1.2. ACV DA CÁPSULA DE ALUMÍNIO

Os dados de entrada da cápsula de alumínio podem ser visualizados na Figura 22 a seguir, de acordo com o inventário levantado anteriormente, juntamente com as informações de transporte e utilização. Após a inserção dos dados de entrada no CES, pode-se obter os dados de gasto energético e pegada de CO₂ para a cápsula de alumínio, conforme Figura 23 e Tabela 13.

Figura 22: Dados de entrada para 1000 cápsulas de alumínio, destinadas à reciclagem.

Product information ?

Name: Cápsula de Alumínio

Material, manufacture and end of life ?

Qty.	Component name	Material	Recycled content	Mass (kg)	Primary process	End of life
1000	Casca	Aluminum, commercial purity, S150.1: LM0-M, cast	Virgin (0%)	0,00081	Casting	Recycle
1000	Membrana	Aluminum, commercial purity, 1-0	Virgin (0%)	0,00014	Extrusion, foil rolling	Recycle

Transport ?

Name	Transport type	Distance (km)
Navio da Suíça para Brasil	Ocean freight	1,5e+04
Caminhão do porto para d	14 tonne (2 axle) truck	150
Transporte urbano para re	Light goods vehicle	15

Use ?

Product life: 6 Years

Country of use: Brazil

Static mode

☒ Product uses the following energy:

Energy input and output: Electric to thermal

Power rating: 1450 W

Usage: 365 days per year

Usage: 0,01 hours per day

Mobile mode

☐ Product is part of or carried in a vehicle:

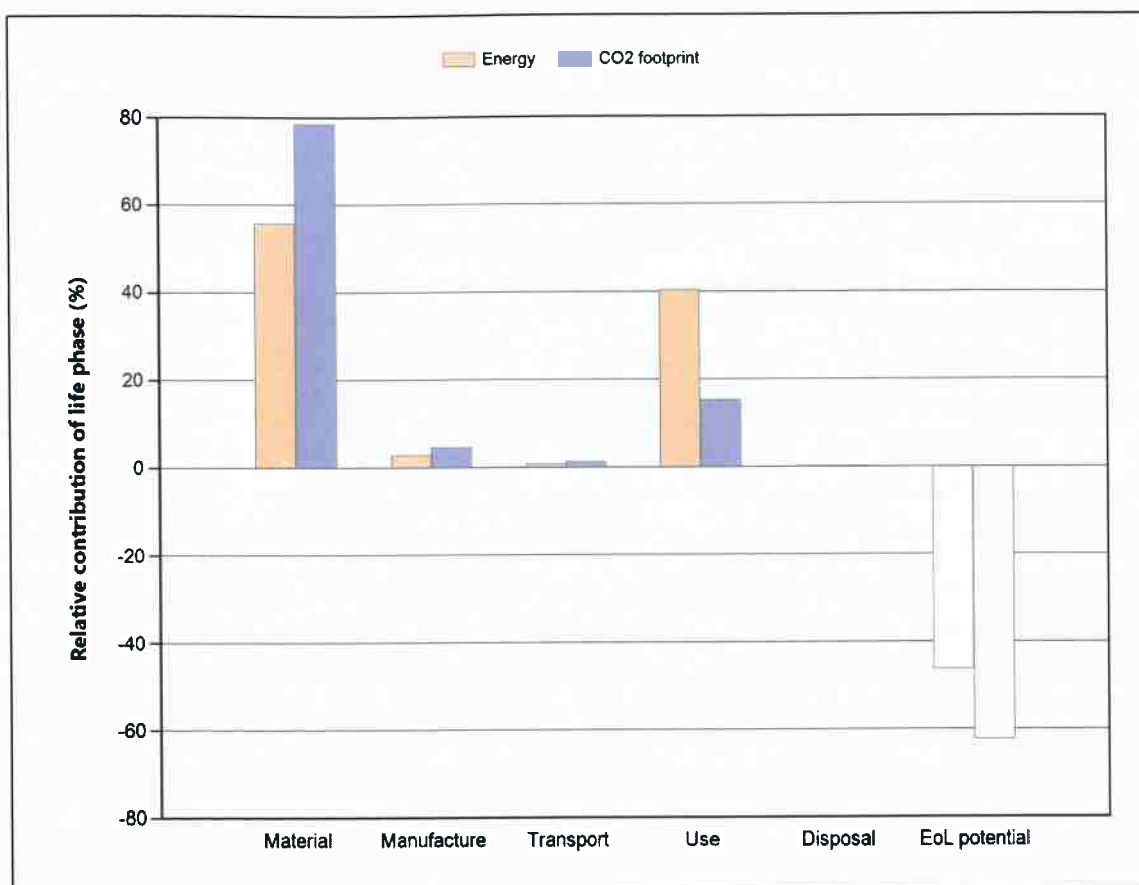
Fuel and mobility type: Diesel - ocean shipping

Usage: 0 days per year

Distance: 0 km per day

Fonte: CES módulo *Eco-Audit Tool*.

Figura 23: Gráfico de ACV de energia e pegada de CO₂ de 1000 cápsulas de alumínio, destinadas à reciclagem.



Fonte: CES módulo *Eco-Audit Tool*.

Tabela 155: Análise de Ciclo de Vida de 1000 cápsulas de alumínio, destinadas à reciclagem.

Fase	Energia (MJ)	Energia (%)	Pegada de CO ₂ (kg)	Pegada de CO ₂ (%)
Material	189,0	55,7	12,3	78,5
Manufatura	9,6	2,8	0,7	4,6
Transporte	2,8	0,8	0,2	1,3
Uso	137,0	40,4	2,4	15,3
Descarte	0,7	0,2	0,1	0,3
Total	340,0	100,0	15,7	100,0
Potencial de Fim de Vida EoL	-157,0		-9,8	

Fonte: CES módulo *Eco-Audit Tool*.

A partir das informações geradas pela ACV do CES pode-se comparar os componentes da cápsula e identificar aquele de maior gasto energético ou de maior pegada de CO₂. Após avaliar e interpretar os dados pode-se prosseguir para a etapa de seleção de materiais, em uma tentativa de encontrar outros materiais para o componente mais crítico, de modo a simular uma cápsula mais ambientalmente correta.⁽¹²⁾ Analisando os dados obtidos, referente a 1000 cápsulas de café, e considerando que 100% delas sejam recicladas, nota-se que a fase material e de uso são as mais críticas tanto no gasto energético quanto na pegada de CO₂.

Entretanto, é muito utópico considerar 100% de reciclagem no fim de vida, principalmente com a problemática de reciclagem existe no Brasil, conforme discutido no tópico 3.3. do presente trabalho. Portanto, foi realizada uma ACV similar, considerando o fim de vida como aterro, para as 1000 cápsulas de alumínio em análise, conforme Figuras 24 e 25 e Tabela 16. Para cada 1000 cápsulas de café de alumínio destinadas ao aterro, a pegada energética é 157 MJ maior, por conta do potencial de fim de vida perdido, e a pegada de CO₂ é 9,8kg de CO₂ superior. Considerando a estimativa da ABIC de 3 bilhões de cápsulas de café consumidas no Brasil em 2017⁽⁶⁾, estamos falando de 29,4 mil toneladas de CO₂, somente por conta do fim de vida desperdiçado no aterro.

Figura 24: Dados de entrada para 1000 cápsulas de alumínio, destinadas ao aterro.

Product information ?

Name: Cápsula de Alumínio

Material, manufacture and end of life ?

Qty.	Component name	Material	Recycled content	Mass (kg)	Primary process	End of life
1000	Casca	Aluminum, commercial purity, S150.1: LM0-M, cast	Virgin (0%)	0,00081	Casting	Landfill
1000	Membrana	Aluminum, commercial purity, 1-0	Virgin (0%)	0,00014	Extrusion, foil rolling	Landfill

Transport ?

Name	Transport type	Distance (km)
Navio da Suíça para Brasil	Ocean freight	1,5e+04
Caminhão do porto para d	14 tonne (2 axle) truck	150
Transporte urbano para rev	Light goods vehicle	15

Use ?

Product life: 6 Years

Country of use: Brazil

Static mode

☒ Product uses the following energy:

Energy input and output: Electric to thermal

Power rating: 1450 W

Usage: 365 days per year

Usage: 0,01 hours per day

Mobile mode

☐ Product is part of or carried in a vehicle:

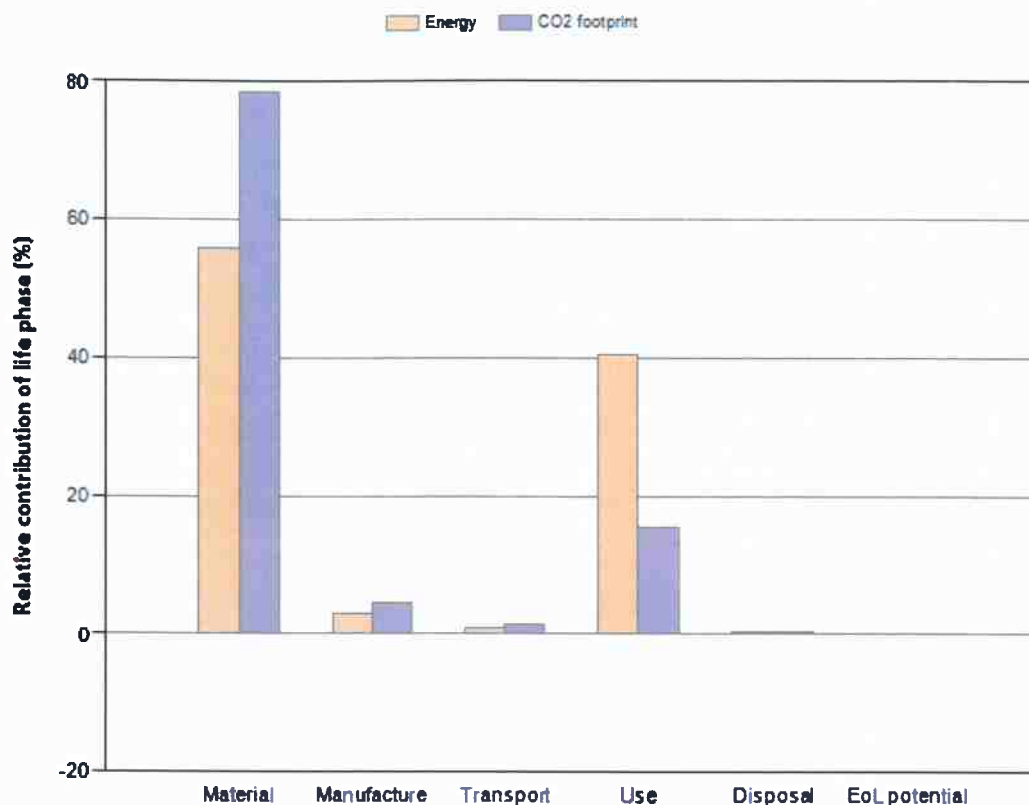
Fuel and mobility type: Diesel - ocean shipping

Usage: 0 days per year

Distance: 0 km per day

Fonte: CES módulo *Eco-Audit Tool*.

Figura 25: Gráfico de ACV de gasto energético e pegada de CO₂ de 1000 cápsulas de alumínio, destinadas ao aterro.



Fonte: CES módulo *Eco-Audit Tool*.

Tabela 16: Análise de Ciclo de Vida de 1000 cápsulas de alumínio, destinadas ao aterro.

Fase	Energia (MJ)	Energia (%)	Pegada de CO2 (kg)	Pegada de CO2 (%)
Material	189,3	55,8	12,3	78,6
Manufatura	9,6	2,8	0,7	4,6
Transporte	2,8	0,8	0,2	1,3
Uso	137,2	40,5	2,4	15,4
Descarte	0,2	0,1	0,0	0,1
Total	339,1	100	15,6	100
Potencial de Fim de Vida EoL	0,0		0,0	

Fonte: CES módulo *Eco-Audit Tool*.

5.1.3. ACV DA CÁPSULA DE POLIPROPILENO

Analogamente à análise realizada no item anterior, referente à cápsula de alumínio, posteriormente ao levantamento do inventário, do processamento dos componentes da cápsula e da cadeia logística das matérias primas, pode-se realizar o Eco-Audit da cápsula de polipropileno. Os dados de entrada para a análise de ciclo de vida desta cápsula podem ser visualizados na Figura 26. Conforme já analisado anteriormente, a casca desta cápsula é feita por polipropileno (PP), cujo fim de vida é a reciclagem. Apesar de a reciclagem do PP ser economicamente viável, já que a energia utilizada no processo é proveniente de fontes renováveis ou até mesmo dos próprios subprodutos da reciclagem (hidrocarbonetos, CO₂ e vapor de água, a qual pode ser pressurizada e utilizada para gerar energia para o próprio processo de reciclagem), muitas recicladoras não consideram este tipo de material como reciclável ⁽³⁴⁾.

Figura 26: Dados de entrada para 1000 cápsulas de polipropileno, destinadas à reciclagem.

Product information ?

Name: Cápsula de Polipropileno

Material, manufacture and end of life ?

Qty.	Component name	Material	Recycled content	Mass (kg)	Primary process	End of life
1000	Casca	PP (homopolymer, clarified/nucleated)	Virgin (0%)	0,00145	Polymer molding	Recycle
1000	Membrana parte 1	Aluminum, commercial purity, 1-0	Virgin (0%)	5,2e-05	Extrusion, foil rolling	Recycle
1000	Membrana parte 2	PE-HD (general purpose, molding & extrusion)	Virgin (0%)	1,2e-05	Polymer extrusion	Recycle

Transport ?

Name	Transport type	Distance (km)
Navio da Suíça para Brasil	Ocean freight	1,5e+04
Caminhão do porto para d	14 tonne (2 axle) truck	150
Transporte urbano para rev	Light goods vehicle	15

Use ?

Product life: 6 Years

Country of use: Brazil

Static mode

☒ Product uses the following energy:

Energy input and output: Electric to thermal

Power rating: 1450 W

Usage: 365 days per year

Usage: 0,01 hours per day

Mobile mode

☐ Product is part of or carried in a vehicle:

Fuel and mobility type: Diesel - ocean shipping

Usage: 0 days per year

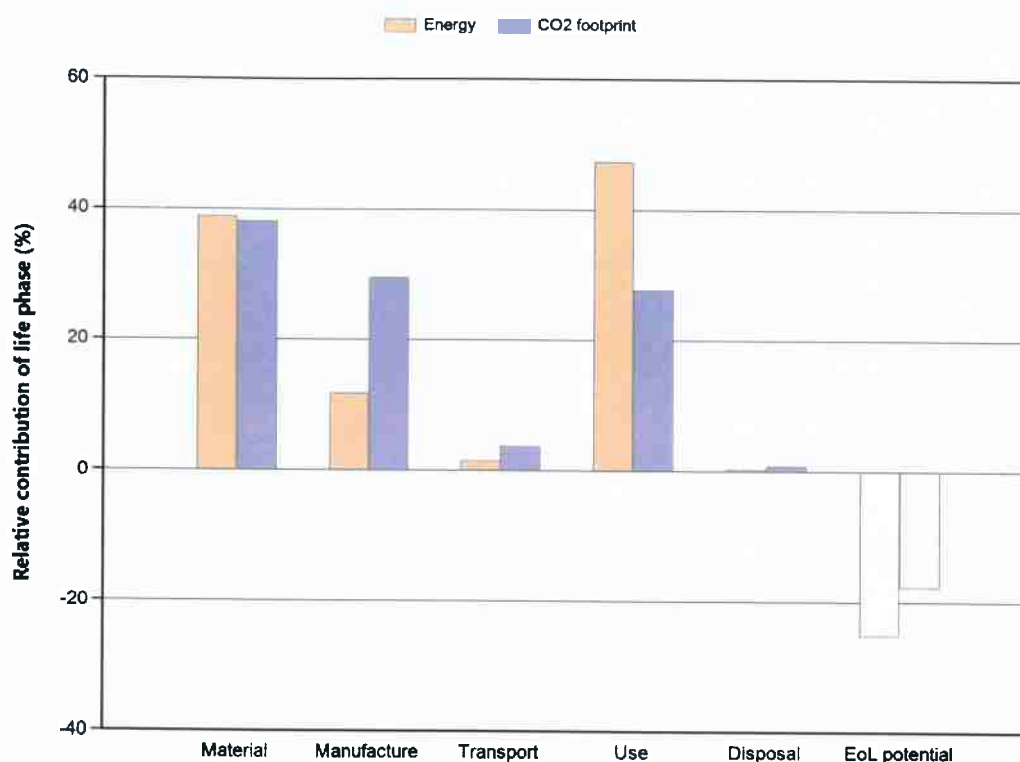
Distance: 0 km per day

Fonte: CES módulo *Eco-Audit Tool*.

Como este produto é utilizado majoritariamente para a indústria alimentícia e deve, portanto, ser 100% virgem, muitas recicladoras consideram desnecessário o investimento na coleta seletiva e na lavagem de PP ⁽¹⁰⁾. Entretanto, após o primeiro uso, há inúmeras aplicações para o PP na área de tecnologia; e a utilização após reciclagem do filme de polipropileno e do alumínio laminado no filme está cada vez mais recebendo investimentos e se tornando relevante no ramo de tecnologias e processos de reciclagem ⁽³⁴⁾. Após a inserção dos dados de entrada (Figura 26), pode-se obter as

informações de gasto energético e pegada de CO₂ para a cápsula de polipropileno, conforme Figura 27 e Tabela 17.

Figura 27: Gráfico de ACV de gasto energético e pegada de CO₂ de 1000 cápsulas de polipropileno, destinadas à reciclagem.



Fonte: CES módulo *Eco-Audit Tool*.

Tabela 17: Análise de Ciclo de Vida de 1000 cápsulas de polipropileno, destinadas à reciclagem.

Fase	Energia (MJ)	Energia (%)	Pegada de CO2 (kg)	Pegada de CO2 (%)
Material	113,0	38,9	3,3	38,1
Manufatura	34,1	11,8	2,6	29,6
Transporte	4,5	1,5	0,3	3,7
Uso	137,0	47,4	2,4	27,7
Descarte	1,1	0,4	0,1	0,9
Total	290,0	100,0	8,7	100,0
Potencial de Fim de Vida EoL	-73,1		-1,5	

Fonte: CES módulo *Eco-Audit Tool*.

Após interpretação dos dados obtidos, para as 1000 cápsulas de polipropileno e fim de vida como reciclagem, nota-se que a fase material (38,1%), manufatura (29,6%) e de uso (27,7%) são as mais críticas tanto no gasto energético quanto na pegada de CO₂. A manufatura da cápsula também possui uma grande pegada de CO₂ e deve ser levada em conta. Entretanto, assim como para as cápsulas de alumínio, não podemos considerar a idealista ideia de que 100% das cápsulas serão recicladas. Portanto, realiza-se também a ACV considerando o aterro sanitário como destino, conforme podemos ver nas Figuras 28 e 29 e Tabela 18.

Para cada 1000 cápsulas de café de polipropileno destinadas ao aterro, a pegada energética é 73,1 MJ superior, por conta do potencial de fim de vida perdido, e a pegada de CO₂ é 1,5kg de CO₂ superior. Considerando a mesma estimativa da ABIC, aplicada no caso da cápsula de alumínio, de 3 bilhões de cápsulas de café consumidas no Brasil em 2017 (6), estamos falando de 4,5 mil toneladas de CO₂, somente por conta do fim de vida desperdiçado no aterro.

Figura 28: Dados de entrada para 1000 cápsulas de polipropileno, destinadas ao aterro.

Product information ?

Name: Cápsula de Polipropileno

Material, manufacture and end of life ?

Qty.	Component name	Material	Recycled content	Mass (kg)	Primary process	End of life
1000	Casca	PP (homopolymer, clarified/nucleated)	Virgin (0%)	0,00145	Polymer molding	Landfill
1000	Membrana parte 1	Aluminum, commercial purity, 1-0	Virgin (0%)	5,2e-05	Extrusion, foil rolling	Landfill
1000	Membrana parte 2	PE-HD (general purpose, molding & extrusion)	Virgin (0%)	1,2e-05	Polymer extrusion	Landfill

Transport ?

Name	Transport type	Distance (km)
Navio da Suíça para Brasil	Ocean freight	1,5e+04
Caminhão do porto para d	14 tonne (2 axle) truck	150
Transporte urbano para res	Light goods vehicle	15

Use ?

Product life: 6 Years

Country of use: Brazil

Static mode

☒ Product uses the following energy:

Energy input and output: Electric to thermal

Power rating: 1450 W

Usage: 365 days per year

Usage: 0,01 hours per day

Mobile mode

☐ Product is part of or carried in a vehicle:

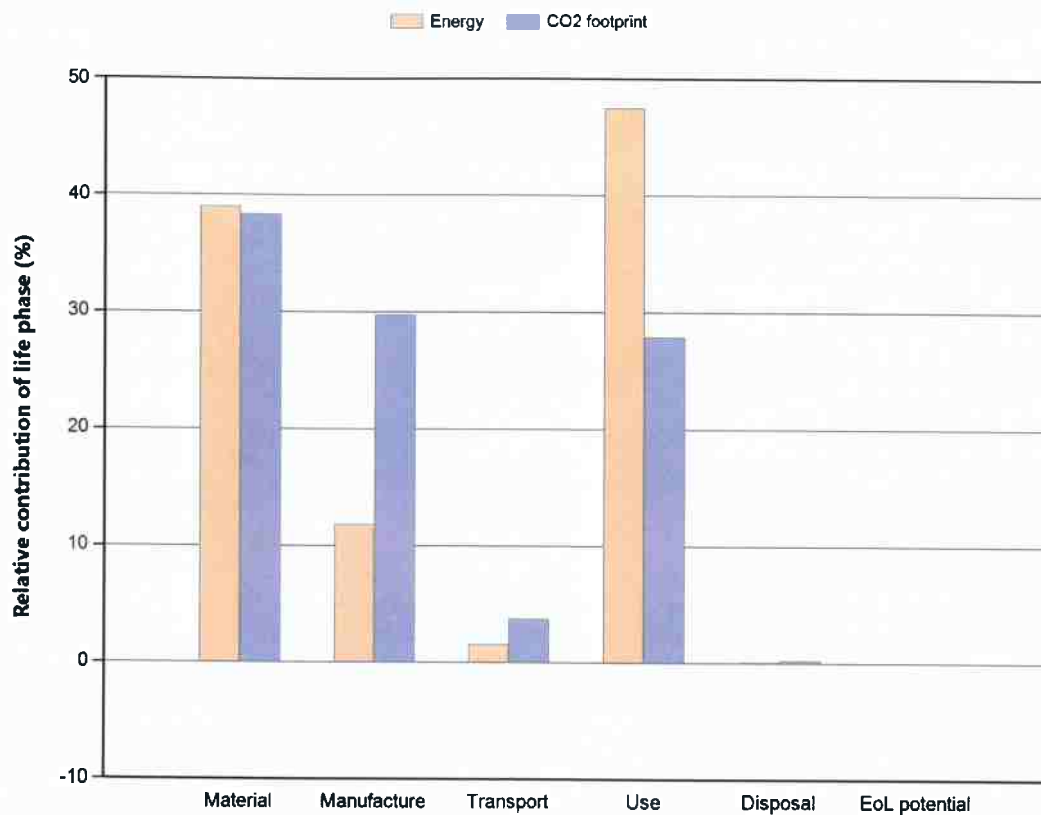
Fuel and mobility type: Diesel - ocean shipping

Usage: 0 days per year

Distance: 0 km per day

Fonte: CES módulo *Eco-Audit Tool*.

Figura 29: Gráfico de ACV de gasto energético e pegada de CO₂ de 1000 cápsulas de polipropileno, destinadas ao aterro.



Fonte: CES módulo *Eco-Audit Tool*.

Tabela 18: Análise de Ciclo de Vida de 1000 cápsulas de polipropileno, destinadas ao aterro.

Fase	Energia (MJ)	Energia (%)	Pegada de CO2 (kg)	Pegada de CO2 (%)
Material	112,7	39,0	3,3	38,4
Manufatura	34,1	11,8	2,6	29,8
Transporte	4,5	1,6	0,3	3,7
Uso	137,2	47,5	2,4	27,9
Descarte	0,3	0,1	0,0	0,2
Total	288,8	100	8,6	100
Potencial de Fim de Vida EoL	0,0		0,0	

Fonte: CES módulo *Eco-Audit Tool*.

5.1.4. ACV DA CÁPSULA DE POLIÁCIDO LÁCTICO

Analogamente às análises anteriores, realiza-se o input das informações referente à cápsula de PLA, a fim de realizar a análise de ciclo de vida da mesma. Os dados inseridos, referente a inventário, processamento primário, fim de vida, transporte e utilização podem ser visualizados na Figura 30. Por conta do destino do fim de vida da cápsula de PLA ser o aterro sanitário, é de se esperar que o potencial de fim de vida dela não traga resultados ⁽⁴⁴⁾. Após a inserção dos dados de entrada no CES pode-se obter as informações da pegada ecológica da cápsula, conforme Figura 31 e Tabela 19.

Figura 30: Dados de entrada para 1000 cápsulas de PLA, destinadas ao aterro.

Product Information ?

Name: Cápsula de Políácido Láctico

Material, manufacture and end of life ?

Qty.	Component name	Material	Recycled content	Mass (kg)	Primary process	End of life
1000	Casca	PLA (general purpose)	Virgin (0%)	0,0043	Polymer molding	Landfill
1000	Membrana parte 1	Aluminum, commercial purity, 1-0	Virgin (0%)	1e-07	Extrusion, foil rolling	Landfill
1000	Membrana parte 2	PE-HD (general purpose, molding & extrusion)	Virgin (0%)	3e-05	Polymer extrusion	Landfill
1000	Filtro de Papel	Paper (cellulose based)	Virgin (0%)	5e-05	Incl. in material value	Landfill

Transport ?

Name	Transport type	Distance (km)
Navio da Suíça para Brasil	Ocean freight	1,5e+04
Caminhão do porto para distribuição	14 tonne (2 axle) truck	150
Transporte urbano para revendedor	Light goods vehicle	15

Use ?

Product life: 6 Years

Country of use: Brazil

Static mode

☒ Product uses the following energy:

Energy input and output: Electric to thermal

Power rating: 1450 W

Usage: 365 days per year

Usage: 0,01 hours per day

Mobile mode

☐ Product is part of or carried in a vehicle:

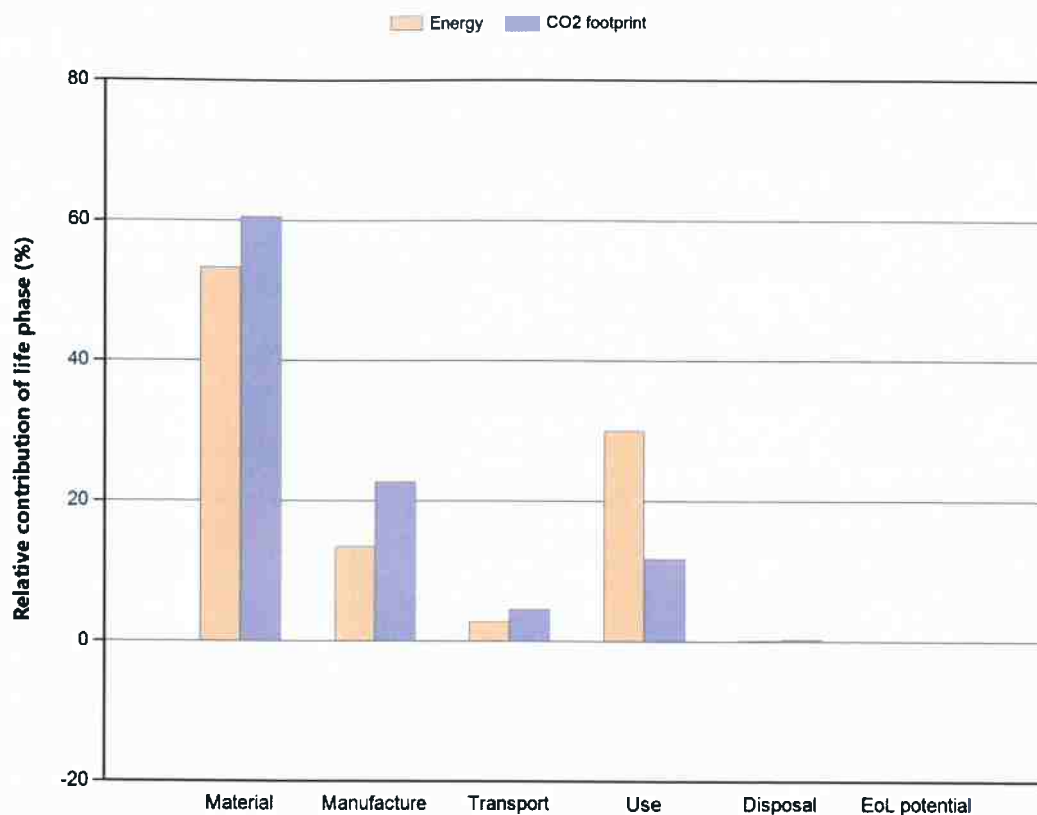
Fuel and mobility type: Diesel - ocean shipping

Usage: 0 days per year

Distance: 0 km per day

Fonte: CES módulo Eco-Audit.

Figura 31: Gráfico de ACV de gasto energético e pegada de CO₂ para 1000 cápsulas de PLA.



Fonte: CES módulo *Eco-Audit Tool*.

Tabela 19: Análise de Ciclo de Vida de 1000 cápsulas de PLA.

Fase	Energia (MJ)	Energia (%)	Pegada de CO2 (kg)	Pegada de CO2 (%)
Material	243,0	53,3	12,3	60,5
Manufatura	61,9	13,6	4,6	22,8
Transporte	13,0	2,8	0,9	4,6
Uso	137,0	30,1	2,4	11,8
Descarte	0,9	0,2	0,1	0,3
Total	456,0	100,0	20,3	100,0
Potencial de Fim de Vida EoL	0,0		0,0	

Fonte: CES módulo *Eco-Audit Tool*.

Após interpretação dos dados obtidos, nota-se que a fase material (60,5%), de manufatura (22,8%) e de uso (11,8%) são as mais críticas tanto no gasto energético quanto na pegada de CO₂. Nota-se que não há potencial de fim de vida uma vez que a cápsula é destinada ao aterro. Por se tratar de uma cápsula de PLA, o qual é biodegradável, as pessoas destinam a cápsula inteira para o aterro, quando na verdade deveria haver uma coleta seletiva de modo a separar as membranas e filtros que não sejam biodegradáveis, tais como as membranas de alumínio e Polietileno desta cápsula (27).

5.1.5. ACV DA CÁPSULA DE AÇO INOXIDÁVEL

Assim como realizado nas análises anteriores, realiza-se a entrada das informações referente à cápsula de aço inoxidável. Vale lembrar que neste caso temos apenas uma única cápsula, a qual é reutilizável, ao invés de considerarmos 1000 cápsulas, como nos outros três casos. Os dados inseridos, referente a inventário, processamento primário, fim de vida, transporte e utilização podem ser visualizados na Figura 32.

Figura 32: Dados de entrada para a cápsula de aço inoxidável 316L.

⌵ Product information ⓘ

Name: Cápsula de Inox 316L

⌵ Material, manufacture and end of life ⓘ

Qty.	Component name	Material	Recycled content	Mass (kg)	Primary process	End of life
1	Cápsula Inox Reutilizável	Stainless steel, austenitic, AISI 316L, annealed	Virgin (0%)	0,05	Forging	Reuse

⌵ Transport ⓘ

Name	Transport type	Distance (km)
Navio da Suíça para Brasil	Ocean freight	1,5e+04
Caminhão do porto para d	14 tonne (2 axle) truck	150
Transporte urbano para rev	Light goods vehicle	15

⌵ Use ⓘ

Product life: 6 Years

Country of use: Brazil

Static mode

☒ Product uses the following energy:

Energy input and output: Electric to thermal

Power rating: 1450 W

Usage: 365 days per year

Usage: 0,01 hours per day

Mobile mode

☐ Product is part of or carried in a vehicle:

Fuel and mobility type: Diesel - ocean shipping

Usage: 0 days per year

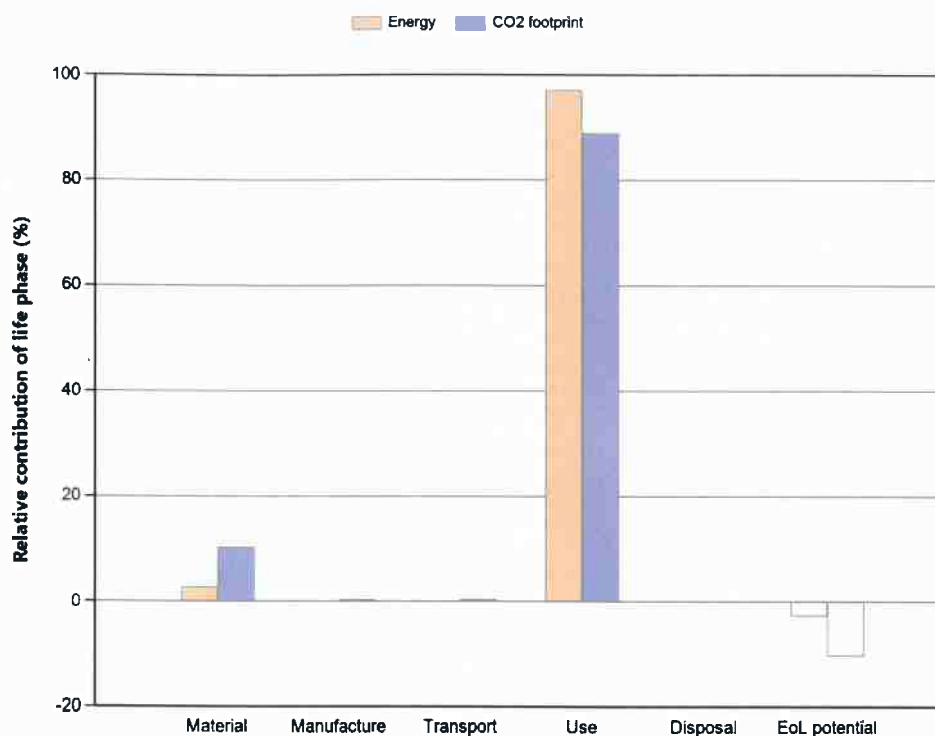
Distance: 0 km per day

Fonte: CES módulo Eco-Audit.

Por se tratar de uma única cápsula reutilizável, é de se esperar que as etapas Material e Manufatura tenham baixa pegada energética e de CO₂. Após a entrada das

informações de entrada no CES pode-se obter os dados referentes à pegada ecológica da embalagem, conforme Figura 33 e Tabela 20.

Figura 33: Gráfico de ACV de gasto energético e pegada de CO₂ da cápsula de aço inoxidável 316L.



Fonte: CES módulo *Eco-Audit Tool*.

Tabela 20: Análise de Ciclo de Vida da cápsula de aço inoxidável.

Fase	Energia (MJ)	Energia (%)	Pegada de CO2 (kg)	Pegada de CO2 (%)
Material	3,8	2,7	0,3	10,3
Manufatura	0,1	0,1	0,0	0,3
Transporte	0,1	0,1	0,0	0,4
Uso	137,2	97,1	2,4	89,0
Descarte	0,0	0,0	0,0	0,0
Total	141,3	100	2,7	100
Potencial de Fim de Vida EoL	-3,8		-0,3	

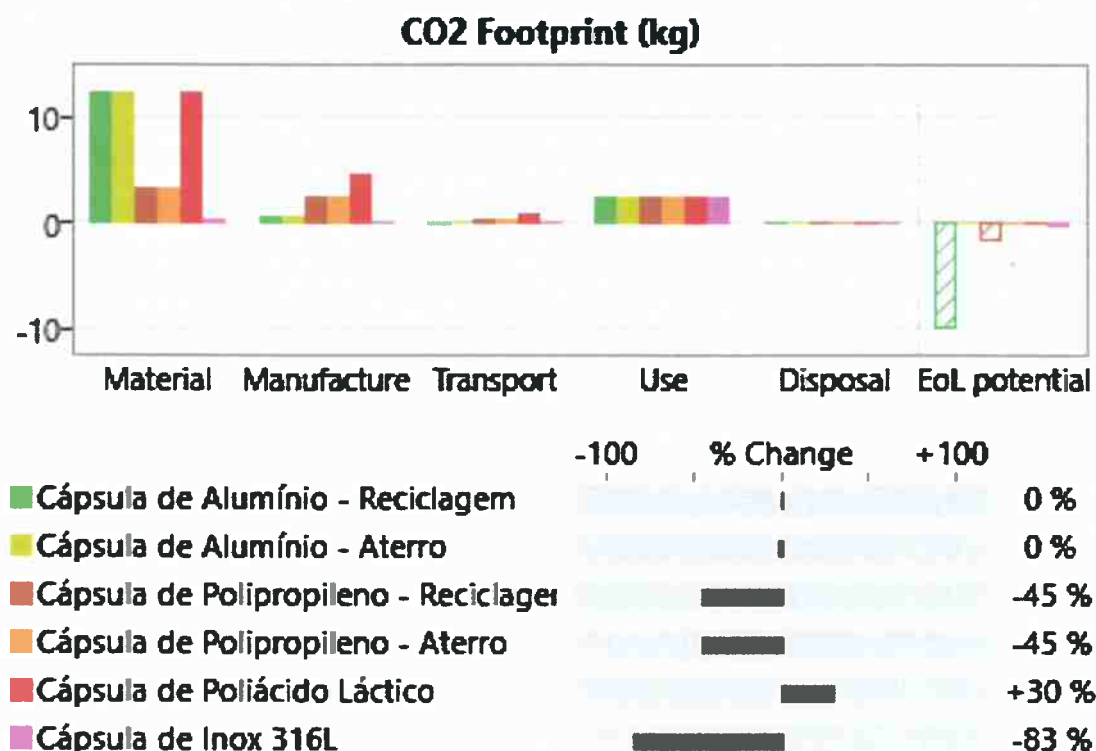
Fonte: CES módulo *Eco-Audit Tool*.

Analisando as informações obtidas, observa-se que a fase material (10,3%) e de manufatura (0,3%) possuem baixíssima participação tanto na pegada de CO₂ quanto no gasto energético, diferentemente das outras cápsulas. A fase mais crítica nesta cápsula é a de uso, a qual é comum em todas as cápsulas. Apesar de a fase de uso ser percentualmente superior à das demais cápsulas, é importante ressaltar que é a mesma utilização que as demais em números absolutos. Ademais, apesar de a fase transporte ser parecida percentualmente às das demais cápsulas, em termos absolutos a pegada de CO₂ é bem menor para o transporte do aço inoxidável, uma vez que foi considerada a substituição de 1000 cápsulas convencionais por 1 cápsula de aço inoxidável.

5.1.6. ACV COMPARATIVO DAS CÁPSULAS

Consolidando todas as informações obtidas pelas ACVs realizadas é possível realizar a comparação entre elas, identificando as cápsulas de maior pegada de CO₂ e energética, etapa por etapa, conforme podemos visualizar respectivamente nas Figuras 34 e 35 a seguir.

Figura 34: ACV comparativa das quatro cápsulas, com fim de vida reciclagem e aterro para as cápsulas de alumínio e de polipropileno, sobre pegada de CO₂.



Fonte: CES módulo *Eco-Audit Tool*.

Pela Figura 34, é notável que a cápsula de aço inoxidável possui uma pegada muito menor de CO₂, uma vez que sua cápsula pode ser reutilizada quantas vezes forem necessárias. Ademais, as cápsulas de alumínio e de polipropileno que são destinadas à reciclagem possuem um potencial de vida, o qual é inexistente nos respectivos casos de destino ao aterro. Podemos realizar a comparação de pegada de CO₂ das cápsulas na Tabela 21:

Tabela 21: Comparativo de pegada de CO₂ (kg) entre as quatro cápsulas de café, com fim de vida reciclagem e aterro para as cápsulas de alumínio e de polipropileno.

Fase	Cápsula de Aço Inox	Cápsula de PP - Aterro	Cápsula de PP - Reciclagem	Cápsula de Alumínio - Aterro	Cápsula de Alumínio - Reciclagem	Cápsula de PLA
Material	0,28	3,30	3,30	12,30	12,30	12,30
Manufatura	0,01	2,56	2,56	0,72	0,72	4,64
Transporte	0,01	0,32	0,32	0,20	0,20	0,93
Uso	2,40	2,40	2,40	2,40	2,40	2,40
Descarte	0,00	0,02	0,07	0,01	0,04	0,06
Total sem EoL	2,70	8,60	8,66	15,63	15,66	20,33
Potencial de Fim de Vida EoL	-0,28	0,00	-1,54	0,00	-9,75	0,00
Total com EoL	2,42	8,60	7,12	15,63	5,91	20,33

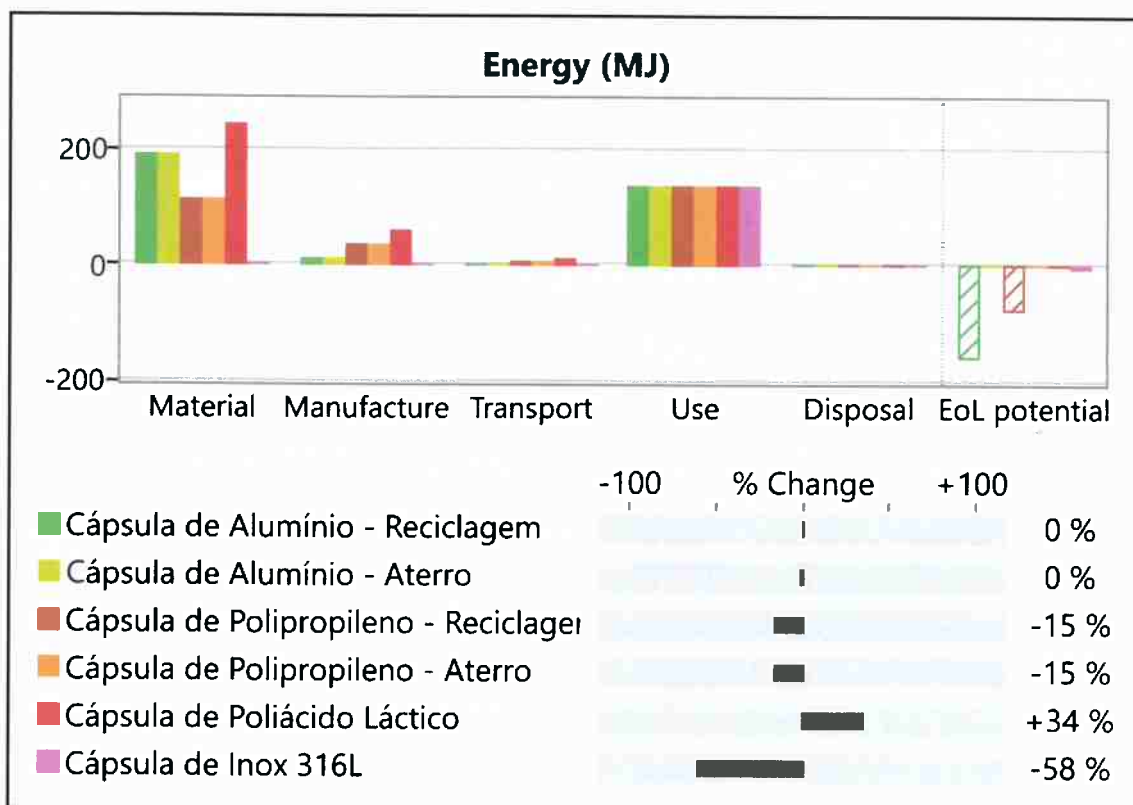
Fonte: CES módulo *Eco-Audit Tool*.

Para analisar todas as cápsulas, é importante ressaltar que estamos comparando uma única cápsula de aço inoxidável com 1000 cápsulas das demais. Exceto pela fase de uso, a qual é comum às quatro cápsulas, em todas as outras etapas a cápsula de aço inoxidável é a que possui menor pegada de CO₂ (sem considerar a sua limpeza), considerando-se o potencial de fim de vida.

Ao se considerar que toda a cápsula de alumínio seja reciclável, ela passa a ser a segunda melhor opção entre as cápsulas. Isto se deve ao potencial de fim de vida do alumínio, pois sabe-se que o alumínio é um material consideravelmente mais reciclável no Brasil do que os plásticos, não apenas pela necessidade financeira, uma vez que a obtenção do alumínio pela bauxita é cara, mas também pela dificuldade de identificação dos polímeros nas coletas seletivas, o qual deixa a cápsula de polipropileno em terceiro lugar ⁽²⁷⁾. Entretanto, sabe-se que não se pode considerar a reciclagem de 100% das cápsulas, uma vez que, em 2017, foram apenas 13,3% de cápsulas recicladas, por conta de diversas dificuldades, dentre as quais a principal é a falta de hábito do consumidor brasileiro ⁽²⁹⁾.

Mesmo sem se considerar o potencial de fim de vida das cápsulas, a cápsula de aço inoxidável 316L continua produzindo a menor pegada de CO₂. Entretanto, o cenário muda para a segunda colocada, que passa a ser a cápsula de polipropileno destinada a aterro. Isto se deve ao fato de que não se pode considerar 100% das cápsulas recicláveis, principalmente com a problemática com reciclagem existente no Brasil, detalhado no item 3.3., assim como nem sempre é possível aproveitar 100% do potencial de fim de vida ⁽²⁹⁾. Portanto, a maior pegada de CO₂ é da cápsula de políácido láctico, em ambos os cenários. Pelo fato de o PLA ser biodegradável e compostável, existe uma imagem de que ele é o mais ecologicamente correto, entretanto, prova-se que ele é o que mais emite CO₂ dentre as cápsulas. Isto se deve ao processo de obtenção do PLA, o qual envolve fermentação de vegetais ricos em amido, onde existe emissão de CO₂. Ademais, no processo de degradação ocorre a emissão do dióxido de carbono e, se em situação anaeróbia, pode ainda emitir gás metano, o qual é o principal responsável pelo efeito estufa ⁽⁴⁴⁾.

Figura 35: ACV comparativa das quatro cápsulas, com fim de vida reciclagem e aterro para as cápsulas de alumínio e de polipropileno, sobre pegada energética.



Fonte: CES módulo Eco-Audit Tool.

Pela Figura 35, é notável que a cápsula de aço inoxidável possui uma pegada muito menor de energia, uma vez que sua cápsula pode ser reutilizada quantas vezes forem necessárias, analogamente à pegada de CO₂. Ademais, as cápsulas de alumínio e de polipropileno que são destinadas à reciclagem possuem um potencial de vida, o qual

é inexistente nos respectivos casos de destino ao aterro. Podemos realizar a comparação de pegada energética das cápsulas na Tabela 22.

Tabela 22: Comparativo de pegada de energia (MJ) entre as quatro cápsulas de café, com fim de vida reciclagem e aterro para as cápsulas de alumínio e de polipropileno.

Fase	Cápsula de Aço Inox	Cápsula de PP - Aterro	Cápsula de PP - Reciclagem	Cápsula de Alumínio - Aterro	Cápsula de Alumínio - Reciclagem	Cápsula de PLA
Material	3,83	113,00	113,00	189,00	189,00	243,00
Manufatura	0,11	34,10	34,10	9,63	9,63	61,90
Transporte	0,15	4,48	4,48	2,81	2,81	13,00
Uso	137,00	137,00	137,00	137,00	137,00	137,00
Descarte	0,01	0,30	1,06	0,19	0,67	0,88
Total sem EoL	141,10	288,88	289,64	338,63	339,11	455,78
Potencial de Fim de Vida EoL	-3,83	0,00	-73,10	0,00	-157,00	0,00
Total com EoL	137,27	288,88	216,54	338,63	182,11	455,78

Fonte: CES módulo *Eco-Audit Tool*.

De forma semelhante à pegada de CO₂, exceto pela fase de uso, a qual é comum às quatro cápsulas, em todas as outras etapas a cápsula de aço inoxidável é a que possui menor pegada de energia. Por conta da alta reciclagem do alumínio, seu potencial de fim de vida contrabalança muito a pegada energética da cápsula deste material, deixando-o em segundo lugar. Apesar de sua fase material ter uma pegada inferior à do alumínio, a cápsula de polipropileno fica em terceiro lugar, mesmo considerando-o 100% reciclável. E novamente a cápsula de PLA fica na última posição, pois, pelo seu destino ser o aterro, seu potencial de fim de vida é zero. Entretanto, sabe-se que a origem do PLA é de fontes renováveis (vegetais ricos em amido), diferentemente dos demais materiais.

Entretanto, analogamente à análise da pegada de CO₂, deve-se também analisar a pegada energética sem se considerar o potencial de fim de vida, devido à problemática de reciclagem existente, juntamente com o não aproveitamento de 100% do potencial de fim de vida. Neste cenário, a cápsula de aço inoxidável 316L continua liderando com uma pegada energética 50% inferior à da segunda melhor cápsula, que passa a ser a de polipropileno destinada ao aterro sanitário. Ou seja, sem se considerar o “Potencial de Fim de Vida”, as cápsulas de polipropileno passam a ser uma opção mais viável em termos de energia do que as cápsulas de alumínio, contrariamente ao senso comum. É importante realçar, no entanto, que o Protocolo de Kyoto usa como parâmetro a pegada de CO₂.

6. CONCLUSÕES

- Após as análises de ciclo de vida realizadas com o *software* CES EDUPACK 2018, obtiveram-se então a pegada de CO₂ de todas cápsulas estudadas, sem se considerar o potencial de fim de vida:
 1. Cápsula de aço inoxidável 316L: 2,70 kg de CO₂ / 1000 usos; 2,42 kg de CO₂ quando se leva em conta o potencial de fim de vida.
 2. Cápsula de polipropileno destinada a aterro: 8,60 kg de CO₂ / 1000 cápsulas.
 3. Cápsula de polipropileno destinada a reciclagem: 7,12 kg de CO₂ / 1000 cápsulas.
 4. Cápsula de alumínio destinada a aterro: 15,63 kg de CO₂ / 1000 cápsulas.
 5. Cápsula de alumínio destinada a reciclagem: 5,91kg de CO₂ / 1000 cápsulas.
 6. Cápsula de poliácido Láctico: 20,33 kg de CO₂ / 1000 cápsulas.
- A análise dos resultados do presente trabalho mostra que, embora existam diferentes tipos de cápsulas de café, feitas de diferentes materiais e em diferentes *designs*, ainda assim tem-se muito a evoluir no mercado de cápsulas de café. Nota-se que as cápsulas reutilizáveis de aço inoxidável são uma ótima alternativa, por possuírem menores pegadas de CO₂ e de energia, entretanto, ainda possuem uma parcela minúscula do mercado brasileiro. Isto ocorre devido à lucratividade existente nas cápsulas de alumínio, a qual supera o interesse das empresas no desenvolvimento das cápsulas reutilizáveis. Lembrando que uma cápsula de alumínio tem um preço médio de R\$2,50 e uma de aço inoxidável reutilizável possui um preço médio de R\$0,40 apenas, considerando um consumidor que tome 2 cápsulas de café por dia ao longo de um ano.
- No que tange à pegada de CO₂, uma cápsula reutilizável de aço inoxidável 316L representa uma diminuição de 82,7% em relação à pegada de CO₂ da cápsula de alumínio, uma redução de 68,6% em relação à cápsula de polipropileno e uma redução de 86,7% em relação à cápsula de PLA. Isto considerando-se que uma cápsula de aço inoxidável substitua 1000 cápsulas convencionais. Caso fosse considerada toda a vida útil da máquina de café, de 6 anos, e o consumo de 2 cafés diários, uma cápsula de aço inoxidável poderia substituir 4380 cápsulas convencionais, aumentando mais ainda a redução da pegada de CO₂.

- Devido à hegemonia das maiores empresas do segmento de café em cápsula, é de sua vontade fomentar o mercado de cápsulas de alumínio devido à lucratividade do ramo, uma vez que o lucro deste setor é imenso e o desenvolvimento da coleta destas cápsulas para reciclagem diminui o custo do produto, tornando o segmento mais lucrativo ainda. Entretanto, sabe-se que não é possível reciclar 100% das cápsulas e nem todas as cidades do Brasil possuem pontos de coleta. Além disso, a maioria das empresas que comercializa as cápsulas convencionais de alumínio ou de polipropileno não oferece as informações necessárias para a reciclagem, não possui pontos de coleta e não explica que para um melhor aproveitamento na reciclagem é necessário separar as partes das cápsulas antes de descartar, o que é imprescindível para que o descarte seja feito no local indicado e não em qualquer lata de lixo ou aterro. Portanto não adianta apenas as cápsulas serem recicláveis, é necessário também que exista uma estrutura para receber e reciclar o material, além de uma conscientização da população da importância que é a reciclagem.
- Ou seja, a cápsula de aço inoxidável 316L é a que possui menor pegada energética e de CO₂, independente da reciclabilidade das demais cápsulas estudadas. Uma cápsula de aço inoxidável possui uma pegada energética 51,2% menor e uma pegada de CO₂ 68,6% menor que a segunda melhor cápsula, a de polipropileno destinada ao aterro sanitário.
- A cápsula de polipropileno é mais ecologicamente correta que a de alumínio, apesar de o *marketing* das indústrias divulgarem o contrário, em prol da lucratividade. A cápsula de políácido láctico (PLA) é a pior em pegada de CO₂ e energética. O fato de ser oriunda de fontes renováveis e ser biocompostável não justificativa o impacto que causa no meio ambiente.
- Em todos os casos analisados através da ACV, o material é o fator mais relevante na decisão da escolha da cápsula. Para as cápsulas de aço inoxidável e de alumínio, a utilização é o fator mais relevante na emissão de poluentes. Já para as cápsulas de polipropileno e de PLA, o material é o fator mais relevante na emissão de CO₂.
- Se o mercado brasileiro de 3 bilhões de cápsulas por ano (estimado pela ABIC em 2017) fosse composto apenas por cápsulas de alumínio, seriam geradas 50 mil toneladas de CO₂ por ano. Se esse mercado fosse 100% substituído por cápsulas reutilizáveis de aço inoxidável, a pegada seria de 8,1 mil toneladas de CO₂ por ano,

39 mil toneladas a menos de emissão anual, considerando que uma cápsula de aço inoxidável substitua 1000 cápsulas de alumínio.

- Entretanto, a sede por lucro das grandes empresas produtoras das cápsulas de café infelizmente prevalece sobre o interesse no meio ambiente.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ABIC, Associação Brasileira da Indústria do Café, acesso em 2018. Disponível em: <http://abic.com.br/estatisticas/indicadores-da-industria/indicadores-da-industria-de-cafe-2017/>
2. ABIA, Associação Brasileira da Indústria da Alimentação. Disponível em: (<http://www.abia.org.br/vsn/>). Acesso em 29 out. 2016.
3. "Como se fazem cápsulas de café?". Tese de Mestrado realizada na Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, em Portugal. Disponível em: https://paginas.fe.up.pt/~projfeup/cd_2012_13/files/REL_1M6_04.PDF
4. DEPEC, Departamento de Pesquisas e Estudos Econômicos. Disponível em: (https://www.economiaemdia.com.br/EconomiaEmDia/pdf/infset_industria_d_e_alimentos.pdf). Acesso em 29 out. 2016.
5. ABAL, Associação Brasileira do Alumínio, acesso em 2018. Disponível em: <http://embalagensdealuminio.com.br/capsulas-de-aluminio-mantem-aroma-e-sabor-do-cafe/>
6. O crescimento das cápsulas de café. Disponível em: <http://www.supervarejo.com.br/o-crescimento-das-capsulas/> . Acessado em 27 de Novembro de 2018.
7. EUROMONITOR, Euromonitor Internacional, empresa de pesquisas estratégicas mundiais de inteligência de mercado, acesso em 2018. Disponível em: <http://www.euromonitor.com/coffee-in-brazil/report>
8. P&Q Engenharia Jr., empresa júnior de consultoria no ramo de engenharia química e de petróleo. Acesso em 2018, disponível em: <https://peqengenhariajr.com.br/capsulas-de-cafe-um-risco-para-o-meio-ambiente/>
9. NESTLÉ, NESPRESSO. Disponível em: www.nestle-Nespresso.com. Acessado em 2 de março de 2018.
10. JORGE, NEUZA. Embalagens para alimentos / Neuza Jorge. – São Paulo: Cultura Acadêmica: Universidade Estadual Paulista, Pró-Reitoria de Graduação, 2013. Disponível em: (<http://www.santoandre.sp.gov.br/pesquisa/ebooks/360234.PDF>). Acesso em 15 jun. 2016.
11. ISO 14040. Life Cycle Assessment. Principles and Framework (1997) – Avaliação do Ciclo de Vida. Princípios e Estrutura

12. CLAUDINO, E. S. e TALAMINI E. (2013) Análise do Ciclo de Vida (ACV) aplicada ao agronegócio - Uma revisão de literatura, Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v.17, n.1, p. 85.
13. Mike Ashby, Patrick Coulter e Charlie Bream. GRANTA DESIGN, CAMBRIDGE, UK. The CES EduPack Eco Audit Tool – A White Paper. Acessado em junho de 2016.
14. TIBOR, T. E FELDMAN, I., (1996). ISO 14000: A Guide to the New Environmental Management Standards. USA: Times Mirror Higher Education Group, p. 499.
15. ISO 14041, (1998) Environmental management -- Life cycle assessment – Goal and scope definition and inventory analysis.
16. ISO 14042, (2000) Environmental management -- Life cycle assessment – Life cycle impact assessment.
17. ENCICLO Soluções sustentáveis Ltda. Disponível em: (<http://enciclo.com.br/index.php/avaliacao>). Acesso em junho de 2016.
18. Mike Ashby. GRANTA DESIGN, CAMBRIDGE, UK. The energy-fingerprints of products. Acessado em junho de 2016.
19. GRANTA DESIGN, CAMBRIDGE, UK. End-of-Life phase: more detail. Disponível em: (http://inventor.grantadesign.com/en/user_guide/eco_endoflife.asp). Acesso em junho de 2016.
20. CICERI, D. N.; GUTOWSKI, T. G.; GARETTI. A tool to estimate materials and manufacturing energy for a product. MIT OPEN ACCESS ARTICLES, 2010. Disponível em: (<https://dspace.mit.edu/handle/1721.1/70917#files-area>). Acesso em junho de 2018.
21. “É verdade que o pum das vacas aumenta o efeito estufa?”. Disponível em: <https://super.abril.com.br/mundo-estranho/e-verdade-que-o-pum-das-vacas-aumenta-o-efeito-estufa/>). Acessado em 27 de Novembro de 2018.
22. SAUR, K., (1997). Life Cycle Interpretation – A Brand New Perspective. Int. J. LCA, vol. 2. Landsberg, Germany: Ecomed, p. 9.
23. Geração de Biocombustível a partir da borra de Café. Disponível em: <http://www.usp.br/portaibiossistemas/?p=7641>. Acesso em janeiro de 2018.
24. Effect of the Type of Bean, Processing, and Geographical Location on the Biodiesel Produced from Waste Coffee Grounds. Rhodri W. Jenkins, Natasha E. Stageman, Christopher M. Fortune, Christopher J. Chuck.

25. ISO 14043, (2000) Environmental management -- Life cycle assessment – Life cycle impact assessment.
26. ASHBY, M.F. MILLER, A. RUTTER, F. SEYMOUR, C. AND WEGST U.G.K. (2011) “CES EduPack for Eco Design-A White Paper”, Granta Design Limited, Cambridge.
27. PONTES, N. À espera de reciclagem, cápsulas de café sobrecarregam aterros sanitários. Folha de São Paulo, 2016. Disponível em: <http://www1.folha.uol.com.br/seminariosfolha/2016/06/1784370-a-espera-de-reciclagem-capsulas-de-cafe-sobrecarregam-aterros-sanitarios.shtml>. Acessado em 7 de outubro de 2018.
28. Reciclagem de Cápsulas de Café. Disponível em: <https://www.nespresso.com/br/pt/como-reciclar>. Acessado em outubro de 2018.
29. Centros de reciclagem da Nespresso. Disponível em: <https://graoespecial.com.br/centro-de-reciclagem-da-nespresso/>. Acessado em 27 de Novembro de 2018.
30. Experimento obtém biodiesel a partir da borra de café. Disponível em: <http://www.usp.br/agen/?p=48062>. Acessado em 27 de Novembro de 2018.
31. Sustainable Energy – without the hot air David J.C. MacKay. Disponível em: <https://withouthotair.com/synopsis10.pdf>. Acessado em 2 de Outubro de 2018.
32. SMITH, W. 1998 – “Princípios de Ciência e Engenharia dos Materiais” – 3ª Edição - Lisboa - McGraw Hill.
33. GoldExpresso. “Sobre as cápsulas”. URL: <http://www.goldexpresso.com/>. Acessado em 2 de outubro de 2018.
34. 2010. Tudo Sobre Plásticos. “Polipropileno PP”. URL: <http://www.tudosobreplasticos.com/Imagens/estruturaPP.JPG>. Acesso em 01 de maio de 2018.
35. Recicla Brasil. “O Polipropileno”. Disponível em <http://reciclabrasil.net/pp.html>. Acessado em 1 de outubro de 2018.
36. Nespresso. 2010. “Aperfeiçoamento da nossa solução de embalagem”. Disponível em: <http://www.nespresso.com/ecolaboration/pt/pt/article/9/2303/capsules.html>. Acessado em 25 de setembro de 2018.
37. ALBERO, Amorós. 2000. Disponível em: <http://www.eesc.sc.usp.br/smm/materiais/downloads/prensagem%20preenchimento%20do%20molde.pdf>. Acessado em 19 de outubro de 2018.

38. Processo de prensagem das cápsulas de alumínio. Disponível em: http://img.alibaba.com/photo/11877471/Capsule_Coffee_Packaging_Machine.jp. Acessado em 19 de Outubro de 2018.
39. Packaging Machinery and Equipment. 1993 – 2012. “ATF-23 - Thermoforming machine for coffee capsules”. Disponível em: <http://www.kt-pack.com/content/view/60/243/lang/en/>. Acessado em 15 de outubro de 2018.
40. CONCEIÇÃO, Marina. 2011. “Como se faz uma cápsula de café?”. Disponível em: http://economico.sapo.pt/noticias/como-se-faz-uma-capsula-de-cafe_132355.html. Acessado em 15 de outubro de 2018.
41. Polietileno verde *I'm Green*. Disponível em: <http://plasticoverde.braskem.com.br/site.aspx/PE-Verde-Produtos-e-Inovacao>. Acessado em 15 de outubro de 2018.
42. 2012. 3D3 Solutions. “IDS Imaging Development Systems (uEye). Disponível em: [http://manual.3d3solutions.com/index.php/Calibrating_Your_Scanner_\(Advanced\)](http://manual.3d3solutions.com/index.php/Calibrating_Your_Scanner_(Advanced)). Acessado em 16 de outubro de 2018.
43. “Controlo de cápsulas de café mediante câmaras de visão artificial”. Disponível em: <http://blog.infaimon.com/pt/2012/03/controlo-de-capsulas-de-cafe-mediante-camaras-de-visao-artificial/>. Acessado em 6 de outubro de 2018.
44. Plástico PLA: alternativa biodegradável e compostável. Disponível em: <https://www.ecycle.com.br/component/content/article/37-tecnologia-a-favor/738-pla-o-plastico-compostavel.html>. Acessado em 20 de outubro de 2018.
45. “Podding the coffee”. Disponível em: http://www.coffeepods2u.com/podding_coffee. Acessado em 18 de Outubro de 2018.
46. Testes de cápsulas reutilizáveis. Disponível em: <https://www.graogourmet.com/blog/capsulas-reutilizaveis-de-cafe/>. Acessado em 12 de novembro de 2018.
47. Fundição de Aço Inoxidável. Disponível em: <https://www.fultecinox.com.br/fundicao-aco-inox>. Acessado em 10 de novembro de 2018.

48. Perguntas Frequentes Tostio sobre cápsulas de aço inoxidável. Disponível em: <http://www.tostio.com.br/conteudo/43/perguntas-frequentes>. Acessado em 12 de novembro de 2018.
49. Stainlees Steel Table. Nomenclatura dos aços inoxidáveis. Disponível em: <http://www.starch.dk/isi/tables/steels.htm>. Acessado em 10 de novembro de 2018.
50. Influência dos Elementos no Aço Inoxidável. Disponível em: http://www.reisteel.com.br/index.php?option=com_content&view=article&id=55:influencia-dos-elementos-no-aco-inoxidavel&catid=34:demo-category. Acessado em 18 de novembro de 2018.
51. BEER, F.P. E JOHNSTON, JR., (1995). E.R. Resistência dos Materiais, 3º Ed., Makron Books, Cap. 7.6. Tensões em vasos de pressão de paredes finas, p. 464.
52. REPLAN Refinaria de Paulínia – Petrobrás. Disponível em: (<http://www.petrobras.com.br/pt/nossas-atividades/principais-operacoes/refinarias/refinaria-de-paulinia-replan.htm>). Acesso em dezembro de 2016.
53. NOTÍCIAS LIMER-CART Como é produzido o BOPP?. Disponível em: (<http://www.limer-cart.com.br/pt/noticia/como-e-produzido-o-bopp/90/2>). Acesso em dezembro de 2016.
54. GRANTA DESIGN, CAMBRIDGE, UK. Getting started with CES. The CES EduPack Resource Book 1. Eco Audit, p. 12.
55. LIMER-CART BOPP. Reciclagem de BOPP Viável ou não. Disponível em: (<http://limer-cart.blogspot.com.br/2015/08/reciclagem-de-bopp-viavel-ou-nao.html>). Acesso em Dezembro de 2017.
56. Reciclagem de Polipropileno, viabilidade. Disponível em: <https://www.portalsaofrancisco.com.br/meio-ambiente/polipropileno>. Acessado em 25 de novembro de 2018.