

UNESP
Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá

Guaratinguetá
2015

TATIANE TOBIAS DA CRUZ

USO DA AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA PARA A DETERMINAÇÃO DA
REDUÇÃO DE EMISSÕES DE GASES DO EFEITO ESTUFA E DO CONSUMO DE
ENERGIA ASSOCIADOS À RECICLAGEM DE EPS

Dissertação apresentada à Faculdade
de Engenharia do Campus de
Guaratinguetá, Universidade Estadual
Paulista, para a obtenção do título de Mestre
em Engenharia Mecânica na área de
Transmissão e Conversão de Energia.

Orientador: Prof. Dr. José Luz Silveira
Co-Orientador: Prof. Dr. Celso Eduardo Tuna

Guaratinguetá
2015

Cruz, Tatiane Tobias da
C957u Uso da avaliação do ciclo de vida para a determinação na
redução de emissões de gases do efeito estufa e do consumo de
energia associados a reciclagem de EPS / Tatiane Tobias da
Cruz . – Guaratinguetá , 2015
102 f. : il.
Bibliografia: f. 91-102

Dissertação (mestrado) – Universidade Estadual Paulista,
Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2015
Orientador: Prof. Dr. José Luz Silveira
Coorientador: Prof Dr. Celso Eduardo Tuna

1. Poliestireno – Reaproveitamento 2. Energia 3. Petróleo
I. Título

CDU 620.1(043)

TATIANE TOBIAS DA CRUZ

ESTA DISSERTAÇÃO FOI JULGADA ADEQUADA PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
“MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA”

PROGRAMA: ENGENHARIA MECÂNICA
ÁREA: ENERGIA

APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO


Prof. Dr. Edson Cocchieri Botelho
Coordenador

BANCA EXAMINADORA:


Prof. Dr. JOSÉ LUZ SILVEIRA
Orientador / Unesp-Feg


Prof. Dr. JOSÉ ALEXANDRE MATELLI
Unesp-Feg


Prof. Dr. LÚCIA BOLLINI BRAGA MACIEL
EEAER

Julho de 2015

DADOS CURRICULARES

TATIANE TOBIAS DA CRUZ

NASCIMENTO 03.06.1986 – Lorena / SP

FILIAÇÃO Luiz Antônio da Cruz
Vanda Cristina Ferreira Tobias da Cruz

2004/2010 Curso de Graduação em Engenharia de Materiais na Escola de Engenharia de Lorena da Universidade de São Paulo.

2013/2015 Curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, nível de Mestrado, na Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá da Universidade Estadual Paulista.

.

*Dedico este trabalho ao meu marido
Jairo Luiz Martins Corrêa, que sempre me
incentiva a buscar meus sonhos.*

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente ao Prof. Dr. José Luz Silveira por permitir a realização deste trabalho, pelo incentivo contínuo e por sua grande contribuição científica e profissional.

Ao Prof. Dr. Celso Eduardo Tuna pela disposição em sempre contribuir com a realização deste trabalho.

Ao Prof. Dr. Rolando Zanzi pela contribuição profissional, científica e pessoal durante o tempo de realização do trabalho no KTH (Instituto Real de Tecnologia), em Estocolmo, Suécia.

Ao KTH (Instituto Real de Tecnologia), por me proporcionar um intercâmbio de três meses para complementação do meu trabalho.

Aos meus companheiros de trabalho, Justo Roberts, Nestor Proenza, Einara Machin, Daniel Travieso, Regina Paulino, Fernando Araújo, Beatriz Helene, Caio Felipe e Monique Pinheiro pela ajuda e amizade.

A todos os funcionários do campus de Guaratinguetá, pela dedicação e pela demonstração de comprometimento.

Aos meus pais Luiz Antônio da Cruz e Vanda Cristina Ferreira Tobias da Cruz por todo o investimento que fizeram em mim, possibilitando melhores condições de estudo e oportunidades. Agradeço também pelo suporte, companheirismo e pelos conselhos.

Aos meus irmãos, Erika Cristina da Cruz e Fábio Tobias da Cruz, pelo apoio e pela companhia, sempre que possível.

A minha tia Eurídice da Conceição Tobias, pelo apoio, incentivo e correção da dissertação.

Ao meu marido, Jairo Luiz Martins Corrêa, pela paciência, pelos conselhos, pelo incentivo e dedicação em todos os momentos.

A CAPES pelo apoio financeiro para a realização deste mestrado.

“Ao transferir bens materiais, o doador perde a sua posse. Há, porém, alguns atributos intrínsecos que não podem ser transferidos de um indivíduo para o outro, como a beleza e a coragem. O conhecimento, por outro lado, é algo tão importante que os deuses decidiram que o doador pode retê-lo mesmo que o tenha transmitido”.

Pitágoras de Samos

CRUZ, T. T. **Uso da avaliação do ciclo de vida para a determinação da redução de emissões de gases do efeito estufa e do consumo de energia associados à reciclagem de EPS.** 2015. 102p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2015.

RESUMO

Resíduos plásticos constituem um grave problema ambiental, pois sua degradação é muito difícil devido à baixa reatividade química. Como esses materiais são obtidos a partir de petróleo e gás natural, recursos não renováveis, a reciclagem é de grande interesse já que etapas iniciais da fabricação de matéria-prima virgem podem ser eliminadas, o que resulta em diminuição do uso desses recursos, redução do consumo de energia e, conseqüentemente na redução de emissões de poluentes associadas ao processo de obtenção da matéria-prima virgem. Esse trabalho avaliou dois processos de reciclagem de poliestireno expandido (EPS) com o objetivo de comprovar os benefícios de suas aplicações, no que se refere ao consumo de energia e emissões de gases do efeito estufa (GEE), utilizando técnicas de avaliação do ciclo de vida (ACV). O primeiro processo, denominado *reciclagem por injeção de vapor*, consiste na inserção de 30 a 40% de resíduos de EPS junto com a matéria-prima virgem na produção convencional de blocos de EPS. O segundo processo, denominado *reciclagem termomecânica* consiste na reciclagem mecânica através de moagem, aglomeração, homogeneização e moldagem para obtenção de poliestireno reciclado. Primeiramente, efetuou-se análise do consumo de energia primária dos processos de produção e reciclagem de EPS e então, o consumo acumulado de energia (CED) de todo o ciclo de vida do EPS foi avaliado. Em fase posterior, realizou-se análise de emissões de GEE dos processos de produção, reciclagem e de todo o ciclo de vida do EPS, para quantificar os níveis de emissões, considerando o potencial de aquecimento global para o horizonte temporal de 100 anos. Fez-se ambas análises, aplicando metodologia de ACV através da utilização de dados de relatórios técnicos de empresas, da literatura científica e do banco de dados Ecoinvent. Os resultados obtidos demonstraram que os processos de reciclagem de EPS estudados promovem redução do consumo de energia e emissões de GEE na manufatura e no ciclo de vida do EPS, quando comparada à destinação desse material em aterros, resultando também na diminuição do uso de recursos naturais (petróleo e gás natural).

PALAVRAS-CHAVE: EPS, reciclagem, ACV, energia, emissões de GEE, petróleo.

CRUZ, T. T. **Use of life cycle assessment for the determination of reducing greenhouse gases emissions and energy consumption associated with recycling of EPS.** 2015. 102p. Dissertation (Master in Mechanical Engineering) - Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2015.

ABSTRACT

Plastic wastes are a serious environmental problem because degradation is difficult due to a low chemical reactivity. As these materials are obtained from oil and gas, a non-renewable resource, recycling is of major interest since early stages of virgin raw material manufacture can be eliminated, resulting in a decrease in energy expenditure and consequent reduction of pollutant emissions associated with the process of obtaining the virgin raw material. This study evaluated two processes of EPS recycling in order to prove the benefits of its application, as regards the reduction of energy consumption and greenhouse gases (GHG) emissions, using life cycle assessment techniques (LCA). The first process, called *recycling by steam injection*, consists of inserting from 30 to 40% of EPS residues together with virgin raw material in the conventional EPS production process to produce EPS blocks. The second process, called *thermomechanical recycling* consists of mechanical recycling through grinding, agglomeration, mixing and molding to obtain recycled polystyrene. Firstly an analysis of energy consumption of EPS production and recycling processes was performed and then the cumulative energy demand (CED) throughout EPS entire life cycle was evaluated. Subsequently is carried out GHG emissions analysis from EPS production, recycling processes and EPS entire life cycle to quantify the levels of emissions considering the global warming potential for the time horizon of 100 years. Both analyzes were made by applying LCA methodology through the use of technical reports, scientific literature and Ecoinvent database. The results showed that the EPS recycling processes studied promote the reduction of energy consumption and GHG emissions in the manufacture and EPS life cycle when compared to disposal of this material in landfills, also resulting in decreased use of natural resources (oil and gas).

KEYWORDS: EPS, recycling, LCA, energy, GHG emissions, oil.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Reação de polimerização do estireno para obtenção de poliestireno.....	24
Figura 2 - Processo de obtenção do poliestireno (PS).....	26
Figura 3 - Consumo global de estireno por aplicação	27
Figura 4 - Consumo global de resina de poliestireno expansível (EPS) em 2013	27
Figura 5 - Taxa de reciclagem de EPS pós-consumo nos EUA (1990-2012)	28
Figura 6 - Destinação de EPS para reuso na Europa (2002)	29
Figura 7 - Reciclagem mecânica de EPS no Brasil (2008-2012)	30
Figura 8 - Produção de EPS reciclado no Brasil por região em 2012	30
Figura 9 - Operações para a produção de EPS a partir de combustíveis fósseis	31
Figura 10 - Esquema de refino de petróleo mais utilizado no Brasil	34
Figura 11 - Representação esquemática do processo desidrogenação catalítica do etilbenzeno	38
Figura 12 - Passos para a produção de pérolas de EPS (poliestireno expansível).....	39
Figura 13 - Processo de produção de poliestireno expandido (isopor).....	41
Figura 14 - Processos de reciclagem do EPS e os produtos obtidos	42
Figura 15 - Esquema do processo de reciclagem por injeção de vapor.....	44
Figura 16 - Processo de reciclagem termomecânica de EPS.....	46
Figura 17 - Etapas do ciclo de vida de um produto ou serviço	47
Figura 18 – Estrutura de um estudo de ACV.....	50
Figura 19 – Sistema de produto x alocação para reciclagem	57
Figura 20 – Ciclo de vida em cascata – ciclo aberto para 3 ciclos de vida.	58
Figura 21 - Matriz energética brasileira no ano de 2013.....	64
Figura 22 – Fronteiras do sistema em estudo: Processo de produção de EPS sem reciclagem.	65
Figura 23 - Fronteira do processo de produção de EPS	66
Figura 24 - Fronteira do processo de reciclagem por injeção de vapor.....	68

Figura 25 - Fronteira do processo de reciclagem termomecânica.....	70
Figura 26 - Ciclo de vida do EPS considerando a reciclagem por injeção de vapor.....	75
Figura 27 - Comparação do consumo de energia no ciclo de vida do EPS com e sem reciclagem.....	77
Figura 28 - Ciclo de vida do EPS com a inserção da reciclagem termomecânica	78
Figura 29 - Comparação do processo de produção com e sem a inserção de resíduos de EPS	83
Figura 30 - Comparativo das emissões de GEEs no ciclo de vida do EPS com e sem a reciclagem por injeção de vapor	87

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Principais métodos de AICV	54
Tabela 2 – Descrições e fórmulas para diferentes métodos de alocação na reciclagem.	58
Tabela 3 – Principais bancos de dados para estudos de ACV	59
Tabela 4 – Principais softwares de ACV	60
Tabela 5 – Entradas e saídas na produção “do portão ao portão” de 1 kg de EPS.....	67
Tabela 6 - Consumo de energia para a produção de EPS	67
Tabela 7 - Consumo de energia do processo de reciclagem por injeção de vapor	69
Tabela 8 - Potencia e tempo de processamento por equipamento.....	70
Tabela 9 - Consumo de energia para cada etapa do processo de reciclagem termomecânica..	70
Tabela 10 - Consumo de energia da extração do petróleo à fabricação da resina de EPS	72
Tabela 11 – Informações sobre transporte.....	72
Tabela 12 - Consumo de combustível no transporte	73
Tabela 13 - Consumo de energia nas etapas de transporte	73
Tabela 14 - Consumo de energia no ciclo de vida do EPS.....	74
Tabela 15 - Consumo de energia nas etapas de transporte considerando a reciclagem	75
Tabela 16 - Consumo energia no ciclo de vida do EPS com a inserção da reciclagem por injeção de vapor, cenário 1	76
Tabela 17 - Consumo energia no ciclo de vida do EPS com a inserção da reciclagem por injeção de vapor, cenário 2	76
Tabela 18 - Consumo de energia no ciclo de vida do EPS reciclado em ciclo aberto	79
Tabela 19 - Consumo de energia para a produção de GPPS (convencional x reciclagem).....	79
Tabela 20 - Potencial de aquecimento global (GWP) dos principais gases do efeito estufa....	81
Tabela 21 - Fatores de emissão para fontes fixas, escopo 1	82
Tabela 22 – Emissões de GEE’s no processo de produção de EPS em estudo	82
Tabela 23 - Emissões de GEE’s do processo de reciclagem por injeção de vapor	83
Tabela 24 - Emissões de GEE's do processo de reciclagem termomecânica	84

Tabela 25 - Fatores de emissão para fontes móveis, escopo 1	85
Tabela 26 – Emissões de GEE para o processo de obtenção da resina de EPS “do berço ao portão” encontradas na literatura	85
Tabela 27 - Emissões de GEE’s no ciclo de vida do EPS	86
Tabela 28 - Consumo energia no ciclo de vida do EPS com a inserção da reciclagem por injeção de vapor	86
Tabela 29 - Emissões de GEE’s para a produção de GPPS (convencional x reciclagem).....	87

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ACV	Avaliação do ciclo de vida
AICV	Avaliação de impacto do ciclo de vida
ANP	Agência nacional do petróleo
CAPES	Coordenação de aperfeiçoamento de pessoal de nível superior
CC	Consumo de combustível
CE	Consumo específico de energia primária
CE _{tr}	Consumo de energia no transporte
CE _T	Consumo de energia total
CED	Cumulative energy demand
CETESB	Companhia de tecnologia de saneamento ambiental
CO ₂ eq	Dióxido de carbono equivalente
CPB	Papelão ondulado
EBSM	Processo de desidrogenação catalítica do etilbenzeno
EMPA	Swiss federal laboratories for materials testing and research
EPA	United States environmental protection agency
EPD	Environmental product declaration
EPS	Poliestireno expansível ou poliestireno expandido
EUA	Estados Unidos da América
FE	Fator de emissão
GA	Gás natural associado
GEE	Gases do efeito estufa
GLP	Gás liquefeito de petróleo
GNA	Gás natural não associado
GPPS	Poliestireno cristal
GWP	Global warming potential
HIPS	Poliestireno de alto impacto
ICV	Inventário do ciclo de vida
IPCC	Intergovernmental panel on climate change
ISO	International organization for standardization
LCA	Life cycle assessment
MRI	Midwest research institute

PE	Polietileno
PEAD	Polietileno de alta densidade
PEBD	Polietileno de baixa densidade
PET	Poli(tereftalato de etileno)
PIB	Produto interno bruto
PS	Poliestireno
PVOH	Álcool polivinílico
Reduc	Refinaria Duque de Caxias
REPA	Resource and environmental profile analysis
Replan	Refinaria de Paulínia
SB	Estireno-butadieno
SBR	Borracha estireno-butadieno
SETAC	Society of environmental toxicology and chemistry
SIN	Sistema interligado nacional
SM	Styrene monomer
UFL	Unidade de fracionamento de líquidos
UNEP	United nations environment programme
UPCGN	Unidade de processamento de condensado de gás natural
UPGN	Unidade de processamento de gás natural
VC	Volume de Controle

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	20
1.1. OBJETIVOS.....	22
1.1.1. Objetivo geral	22
1.1.2. Objetivos específicos.....	22
1.2. METODOLOGIA	22
1.3. ESTRUTURA DO TRABALHO	22
2. POLIESTIRENO EXPANDIDO (EPS)	24
2.1. CARACTERIZAÇÃO DO POLIESTIRENO (PS)	24
2.2. MERCADO MUNDIAL E BRASILEIRO DE EPS: SITUAÇÃO ATUAL E PERSPECTIVAS	26
2.3. RESÍDUOS DE EPS: GERAÇÃO E DESTINAÇÃO	28
2.4. PROCESSO DE PRODUÇÃO DO EPS VIA ROTA PETROQUÍMICA	31
2.4.1. Extração, pré-tratamento, transporte do petróleo e do gás natural	32
2.4.2. Refino do petróleo e processamento do gás natural	33
2.4.2.1. Refino do petróleo	33
2.4.2.2. Processamento do gás natural.....	35
2.4.3. Produção de petroquímicos básicos	36
2.4.4. Produção de etilbenzeno	37
2.4.5. Produção do estireno	37
2.4.6. Produção da resina de poliestireno expansível (EPS).....	39
2.4.7. Produção do poliestireno expandido (EPS).....	40
2.5. RECICLAGEM DE EPS	41
2.5.1. Estado da arte da reciclagem de EPS	42
2.5.2. Processos de reciclagem de EPS estudados.....	44
2.5.2.1. Processo de reciclagem por injeção de vapor.....	44
2.5.2.2. Processo de reciclagem termomecânica	45

3. AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA	47
3.1. HISTÓRICO E NORMALIZAÇÃO	48
3.2. APLICAÇÕES, USOS E LIMITAÇÕES.....	49
3.3. METODOLOGIA PARA CONDUÇÃO DE ESTUDOS DE ACV	50
3.3.1. Definição de objetivo e escopo na ACV	51
3.3.2. Análise de inventário do ciclo de vida (ICV).....	52
3.3.3. Avaliação de impactos ambientais do ciclo de vida (AICV)	53
3.3.3.1. Seleção das categorias de impacto na AICV	53
3.3.3.2. Métodos de avaliação de impactos ambientais na AICV	53
3.3.3.3. Classificação na AICV	54
3.3.3.4. Caracterização na AICV	54
3.3.3.5. Normalização, agrupamento e ponderação na AICV	55
3.3.4. Interpretação dos resultados na ACV	56
3.4. ACV E PROCESSOS DE RECICLAGEM	56
3.5. SOFTWARES E BANCOS DE DADOS PARA ESTUDOS DE ACV	59
3.6. TRABALHOS DE ACV SOBRE EPS.....	60
4. ANÁLISE DO CONSUMO DE ENERGIA	63
4.1. ANÁLISE DE CONSUMO DE ENERGIA “DO PORTÃO AO PORTÃO”	65
4.1.1. Análise de consumo de energia no processo de produção do EPS	66
4.1.2. Análise de consumo de energia na reciclagem por injeção de vapor	68
4.1.3. Análise de consumo de energia na reciclagem termomecânica	69
4.2. ANÁLISE DE CONSUMO DE ENERGIA “DO BERÇO AO TÚMULO”	71
4.2.1 Análise de consumo de energia no ciclo de vida do EPS: Processo de produção convencional.....	71
4.2.2. Análise de consumo de energia no ciclo de vida do EPS com a inserção da reciclagem por injeção de vapor	74
4.2.3. Análise de consumo de energia no ciclo de vida do EPS com a inserção da reciclagem termomecânica	77

5. ANÁLISE DE EMISSÕES DE GASES DO EFEITO ESTUFA (GEE).....	80
5.1. ANÁLISE DE GEEs “DO PORTÃO AO PORTÃO”	80
5.1.1. Análise de GEEs no processo de produção do EPS.....	80
5.1.1.1. Potencial de aquecimento global (GWP).....	80
5.1.2. Análise de GEEs na reciclagem por injeção de vapor	82
5.1.3. Análise de GEEs na reciclagem termomecânica.....	83
5.2. ANÁLISE DE GEEs “DO BERÇO AO TÚMULO”	84
5.2.1. Análise de GEEs no ciclo de vida do EPS: Processo de produção convencional ...	84
5.2.2. Análise de GEEs no ciclo de vida do EPS com a inserção da reciclagem por injeção de vapor.....	86
5.2.3. Análise de GEEs no ciclo de vida do EPS com a inserção da reciclagem termomecânica.....	87
6. CONCLUSÕES	89
REFERÊNCIAS	91

1. INTRODUÇÃO

A questão ambiental tem sido discutida com maior ênfase nas últimas quatro décadas, devido ao comportamento de consumo da população, que está diretamente ligado ao desenvolvimento da sociedade. Porém, os recursos naturais disponíveis não são suficientes para acompanhar esse padrão de consumo, que cresce com o desenvolvimento tecnológico e o crescimento econômico e populacional.

Desde a crise do petróleo, questiona-se a relação entre a demanda de bens e a capacidade do meio ambiente em suprir essa demanda. Além da possibilidade de esgotamento dos recursos naturais, têm-se os efeitos de sua exploração sobre o meio ambiente, como o aumento de emissões de poluentes, a contaminação do solo e da água e outros impactos ambientais intensificados por ações antrópicas¹.

Entre os recursos naturais mais utilizados pelo homem estão os combustíveis fósseis (petróleo, gás natural e carvão mineral), que são usados para fins energéticos² e não energéticos³. Nas últimas décadas o setor de derivados não energéticos do petróleo tem crescido devido ao aumento da demanda por materiais plásticos. A produção de plásticos aumentou de aproximadamente 1,7 milhões de toneladas em 1950 para 288 milhões de toneladas em 2012 e as indústrias têm buscado fontes alternativas de matéria-prima devido à baixa oferta de recursos petroquímicos, ao alto custo de importação e ao marketing ambiental positivo (PLASTICS EUROPE, 2013).

Uma alternativa viável para a substituição de matéria-prima é a reciclagem, que permite a substituição (parcial ou total) de matéria-prima virgem por resíduos que seriam descartados no meio ambiente. A reciclagem é uma das ações mais importantes disponíveis atualmente para reduzir os impactos dos resíduos plásticos e representa uma das áreas mais dinâmicas na indústria plástica atualmente (HOPEWELL; DVORAK; KOSIOR, 2009). Além de poupar recursos naturais, a reciclagem possibilita a diminuição da geração de resíduos, da poluição do

¹ De acordo com o dicionário PRIBERAM (2014), antrópico significa algo relativo ao ser humano ou à sua ação. Que resulta da ação humana. De origem grega, a palavra “*anthropos*” quer dizer homem.

² A utilização de combustíveis fósseis para fins energéticos é aquela relacionada ao uso do recurso para geração de energia.

³ Combustíveis fósseis para fins não energéticos são utilizados principalmente como matéria-prima nas indústrias petroquímica (plásticos, tintas, fibras sintéticas e borracha) e de fertilizantes (uréia, amônia e seus derivados), comércio, serviços, domicílios etc., nos mais variados usos (MMA, 2014).

ar, da água e do solo, uma vez que se eliminam as etapas primárias de fabricação e não mais se depositam os resíduos em aterros ou os incineram.

Os processos de reciclagem de materiais plásticos são constantemente classificados em quatro tipos (SPINACÉ; PAOLI, 2005): primária ou re-extrusão, secundária ou mecânica, terciária ou química e quaternária ou energética. Do ponto de vista industrial, a reciclagem mecânica é a mais adequada, porque tem baixo custo e boa confiabilidade (HAMAD; KASEEM; DERI, 2013).

Visando corroborar os benefícios ambientais da reciclagem de materiais plásticos, neste trabalho são estudados dois processos de reciclagem mecânica de poliestireno expandido (EPS), popularmente conhecido como isopor. O EPS é composto basicamente de 2 % de poliestireno (PS) em volume e 98 % de vazios contendo ar, tem cor branca, é inodoro, reciclável e fisicamente estável. Ele é utilizado por sua leveza, resistência, facilidade de trabalhar e baixo custo e sua densidade pode variar de 15 a 50 kg/m³ (SCHEIR, 1998). Apesar de ser um material quimicamente inerte, o EPS ocasiona problemas na destinação em aterros devido ao volume que ocupa e a geração de CO₂ quando incinerado.

O primeiro processo estudado neste trabalho, denominado reciclagem por injeção de vapor, consiste em um processo convencional de produção de EPS adaptado para receber de 30 a 40% de resíduos de EPS, que são previamente triturados e depois inseridos no processo de produção para confecção de blocos e placas de EPS. O segundo processo, denominado reciclagem termomecânica, realiza a reciclagem do EPS por meio da trituração do material, retirada do ar por aquecimento e posterior homogeneização para a produção de poliestireno reciclado.

O método utilizado para a avaliação dos aspectos ambientais e dos potenciais impactos dos processos de produção e reciclagem de EPS é a avaliação do ciclo de vida (ACV). Com a inserção da reciclagem no ciclo de vida do EPS, as consequências ambientais em seu ciclo de vida são modificadas e a ferramenta de ACV permite um estudo comparativo do desempenho ambiental do EPS com e sem a reciclagem. O estudo de ACV é realizado utilizando a base de dados Ecoinvent bem como dados da literatura científica e de relatórios técnicos de empresas, através de análises do processo convencional de produção de EPS e dos processos de reciclagem propostos a fim de quantificar o consumo acumulado de energia (CED) e os níveis de emissões de gases do efeito estufa (GEE) durante a manufatura e em todo ciclo de vida do EPS.

1.1. OBJETIVOS

1.1.1. Objetivo geral

O objetivo desse estudo é avaliar a possibilidade de redução do consumo de energia e emissão de GEEs com a inserção de processos de reciclagem no ciclo de vida do EPS.

1.1.2. Objetivos específicos

- Levantar dados sobre a situação atual dos rejeitos de materiais a base de poliestireno expandido e o potencial de reciclagem destes rejeitos;
- Estudar dois processos de reciclagem de EPS: reciclagem por injeção de vapor e reciclagem termomecânica;
- Demonstrar os benefícios ambientais da reciclagem do EPS.

1.2. METODOLOGIA

Para avaliar os benefícios da inserção da reciclagem no ciclo de vida do EPS, análises de consumo de energia e emissões de GEE's na manufatura e no ciclo de vida do EPS são realizadas através de estudos de avaliação do ciclo de vida (ACV). A determinação dos GEE's foi realizada de acordo com o IPCC (2013), considerando o GWP de 100 anos e o levantamento do consumo de energia baseado em energia primária acumulada (CED - Cumulative energy demand). A base de dados Ecoinvent, bem como dados de relatórios técnicos de empresas e da literatura científica também foram utilizados como suporte para a conclusão do trabalho.

1.3. ESTRUTURA DO TRABALHO

Esse trabalho está estruturado em seis capítulos. No presente capítulo, é apresentada uma breve introdução sobre a motivação para a escolha do tema, bem como os objetivos,

metodologia e estrutura do trabalho. No Capítulo 2, é apresentado o poliestireno expandido (EPS) quanto às suas propriedades, aspectos de mercado, geração de resíduos, processo de produção e processos de reciclagem de EPS. São apresentados o processo de produção convencional do EPS e os processos de reciclagem estudados. O capítulo se encerra com a apresentação do estado da arte no que se refere à reciclagem de EPS. No Capítulo 3, é apresentada a metodologia de avaliação do ciclo de vida com relação às suas características e aplicações e também uma descrição de estudos de ACV de EPS encontrados na literatura. No Capítulo 4, o processo de produção convencional e os processos de reciclagem de EPS estudados são analisados quanto ao consumo de energia na manufatura “do portão ao portão” e posteriormente, englobando todo o ciclo de vida do EPS, “do berço ao túmulo”. No Capítulo 5, o processo de produção convencional, os processos de reciclagem e todo o ciclo de vida do EPS são analisados quanto ao potencial de aquecimento global (GWP) para um horizonte de 100 anos.

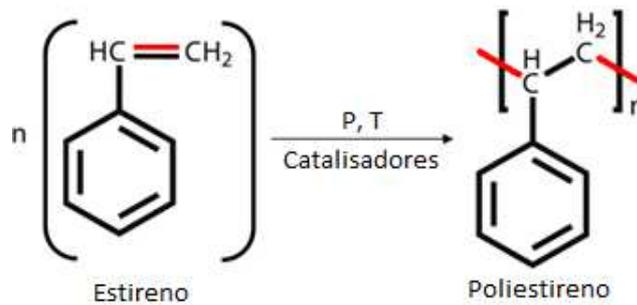
A partir dos resultados obtidos nos capítulos anteriores, no Capítulo 6, é apresentado um extrato das análises realizadas como resposta aos objetivos apresentados para este trabalho.

2. POLIESTIRENO EXPANDIDO (EPS)

2.1. CARACTERIZAÇÃO DO POLIESTIRENO (PS)

O Poliestireno (PS), uma das mais antigas resinas sintéticas, é uma resina termoplástica resultante do processo de polimerização do estireno (Figura 1). O estireno é um dos intermediários químicos mais valiosos e mais utilizados em sínteses orgânicas, devido ao seu emprego como matéria-prima na produção de borrachas sintéticas, plásticos e resinas copoliméricas (LEE, 1963).

Figura 1 - Reação de polimerização do estireno para obtenção de poliestireno



Fonte: Adaptado de MUNDO EDUCAÇÃO (2014)

O primeiro relato da descoberta do poliestireno data de 1839, quando Eduard Simon destilou resina estoraque obtida através da “árvore da Turquia” (líquido âmbar oriental) com uma solução de carbonato de sódio e obteve um óleo o qual ele analisou e nomeou estírol (agora denominado de estireno) (SCHEIRS; PRIDDY, 2003).

A primeira produção para comercialização do poliestireno (PS) foi feita pela BASF, em 1931 seguida pela DOW, em 1938, e devido à falta de tecnologia para sua manufatura em grandes quantidades, somente em 1946, o poliestireno começou a ser produzido em quantidades significativas (SCHEIRS; PRIDDY, 2003).

Em resposta às necessidades do mercado e através do aprimoramento da tecnologia de manufatura, foram desenvolvidos três tipos de poliestireno, a saber:

- a) *Poliestireno cristal (GPPS)*: consiste no estireno polimerizado sem aditivos, é transparente, tem alto brilho, é duro, quebradiço e de fácil coloração (MONTENEGRO; SERFATY, 2002). Também denominado poliestireno normal, ele

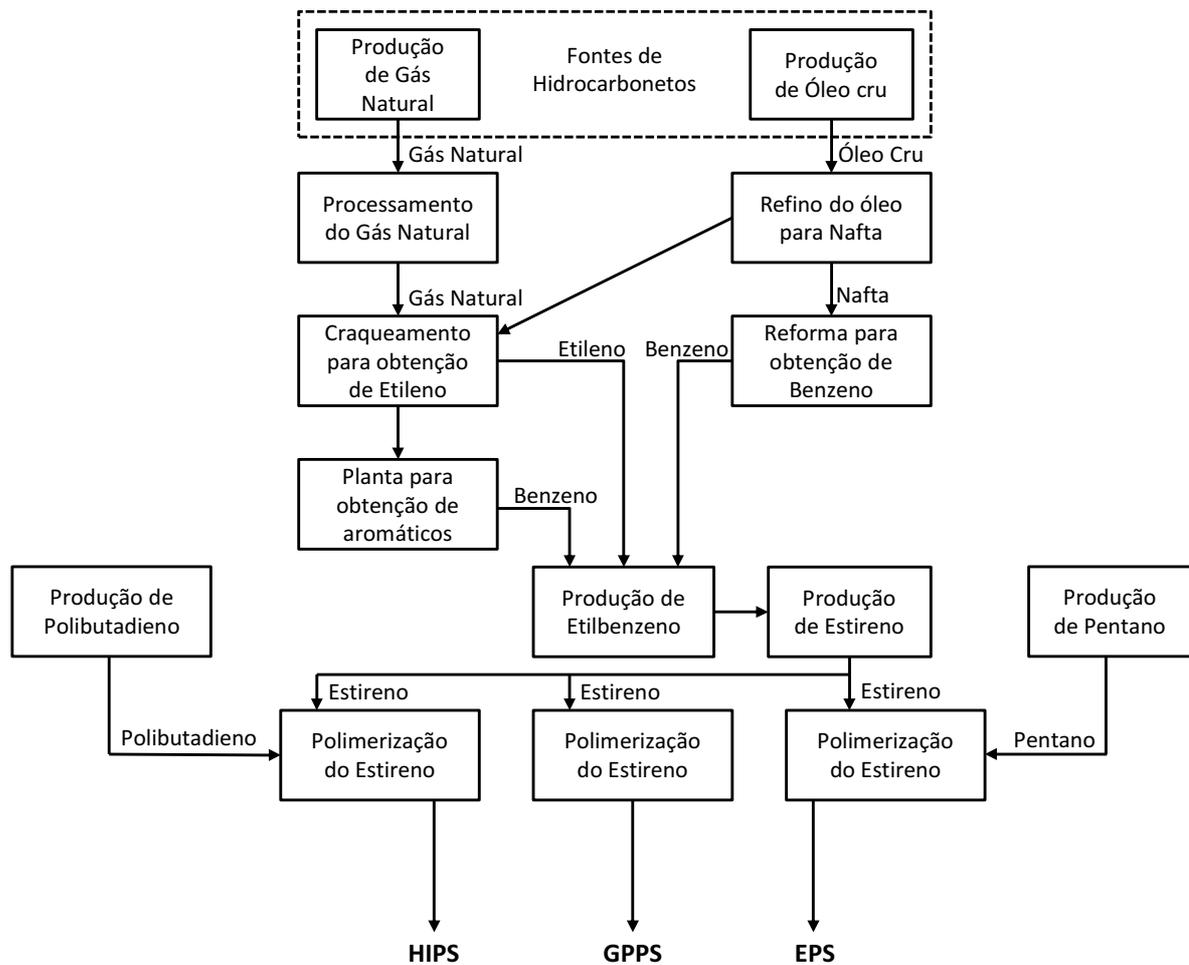
é utilizado principalmente em embalagens, eletrodomésticos e produtos para laboratório, indústria farmacêutica e eletroeletrônica.

- b) *Poliestireno de alto impacto (HIPS)*: obtido através da incorporação de polibutadieno na matriz polimérica de poliestireno. A dispersão de polibutadieno implica no aumento da resistência ao impacto e da tenacidade do polímero (LEE, 2003). O HIPS é opaco e rígido, e é utilizado principalmente em eletroeletrônicos, eletrodomésticos, componentes para as indústrias eletrônica e automobilística (ROVERE et al., 2008).
- a) *Poliestireno expansível*⁴: constitui de poliestireno com adição de pentano, um agente expensor que permite ao poliestireno obter característica de uma espuma semi-rígida, de baixa densidade e bom isolamento térmico. O poliestireno expandido (EPS) tem boa resistência à compressão, à absorção de choques, resistência ao envelhecimento e baixa absorção de água o que permite que ele seja usado principalmente como embalagem e na construção civil como isolante térmico (ABRAPEX, 2008).

Na Figura 2, é possível observar o processo de produção das resinas de poliestireno a partir de combustíveis fósseis.

⁴ Poliestireno expansível é o nome dado a resina que é matéria-prima para a fabricação de poliestireno expandido. Ela recebe esta denominação devido à adição de pentano em sua composição, agente expensor que será responsável pela formação do poliestireno expandido. Alguns autores denominam a sigla EPS também para o poliestireno expansível.

Figura 2 - Processo de obtenção do poliestireno (PS)

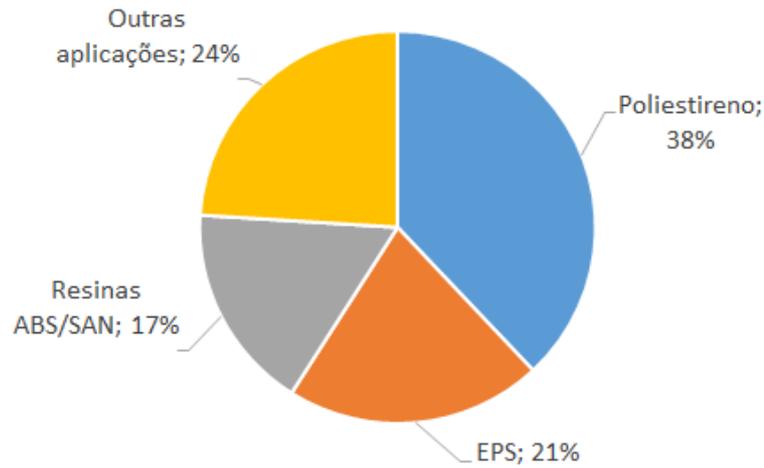


Fonte: (THE PLASTICS PORTAL, 2014)

2.2. MERCADO MUNDIAL E BRASILEIRO DE EPS: SITUAÇÃO ATUAL E PERSPECTIVAS

Nos últimos 50 anos, a produção mundial de termoplásticos cresceu rapidamente, devido à crescente demanda. De acordo com a Merchant Research & Consulting Ltd (2014a), o consumo global de estireno é impulsionado pela demanda de poliestireno e EPS (outras aplicações em menores quantidades incluem estireno-butadieno (SB), resina insaturada de polietileno (PE), borracha de estireno-butadieno (SBR), etc). Cerca de 59% de todo estireno produzido no mundo em 2013 foi utilizado como matéria-prima para a produção de poliestireno (38% GPPS e HIPS e 21% EPS), como é possível observar na Figura 3.

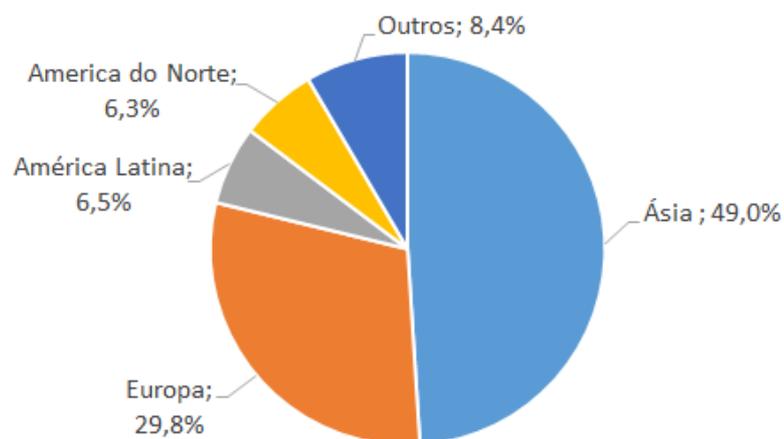
Figura 3 - Consumo global de estireno por aplicação



Fonte: (MERCHANT RESEARCH & CONSULTING ITD, 2014a)

A demanda global de poliestireno e poliestireno expansível (EPS) aumentou de 13 milhões de toneladas, em 2000, para cerca de 14,9 milhões de toneladas, em 2010. A demanda cresceu a uma taxa anual média de 1,4% entre 2000 e 2010, sendo os principais consumidores as indústrias de embalagem, construção civil, eletrodomésticos e eletrônicos (PLASTEMART, 2013). Os principais mercados consumidores da resina de EPS em 2013 foram a Ásia, seguida da Europa e da América Latina (Figura 4).

Figura 4 - Consumo global de resina de poliestireno expansível (EPS) em 2013



Fonte: (MERCHANT RESEARCH & CONSULTING ITD, 2014b)

A previsão de crescimento da demanda global de poliestireno no período de 2010 a 2020, é estimada a uma taxa anual média de crescimento de 4,7%, o que levará a uma demanda global de poliestireno de 23,5 milhões de toneladas em 2020 (BUSINESS WIRE, 2014).

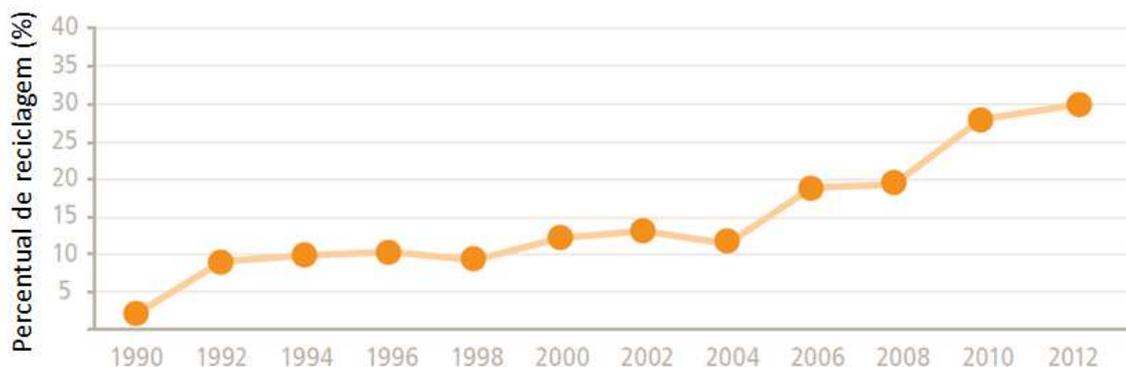
O Brasil segue a tendência mundial de aplicação do estireno, sendo o maior uso para a fabricação de poliestireno. O poliestireno representou cerca de 5% das resinas termoplásticas consumidas em 2012 (330 mil toneladas). Destas, 66 mil toneladas corresponderam a resina de EPS (ABIPLAST, 2012). A capacidade nominal brasileira de produção de poliestireno é de 585 mil toneladas, porém em 2013 a produção e o consumo aparente ficaram abaixo de 400 mil toneladas (PLÁSTICOS EM REVISTA, 2014).

2.3. RESÍDUOS DE EPS: GERAÇÃO E DESTINAÇÃO

Polímeros termoplásticos usados em materiais para embalagem são frequentemente descartados depois de um único uso, o que resulta em uma grande quantidade de resíduos poliméricos. Embalagens de EPS tem um ciclo de vida curto e isso causa sérios problemas ambientais porque o EPS não é biodegradável. Disposição em aterro e incineração, métodos tradicionais de disposição de poliestireno expandido, não podem resolver completamente o problema de poluição ambiental porque esses métodos causam facilmente poluição secundária (POLETTO et al., 2011; GUTIÉRREZ et al., 2012).

O poliestireno expandido (EPS) tem sido reciclado com sucesso por produtores e consumidores em todo o mundo. A Figura 5 ilustra a evolução da taxa de reciclagem de EPS pós-consumo nos EUA de 1990 a 2012 (EPS INDUSTRY ALLIANCE, 2012).

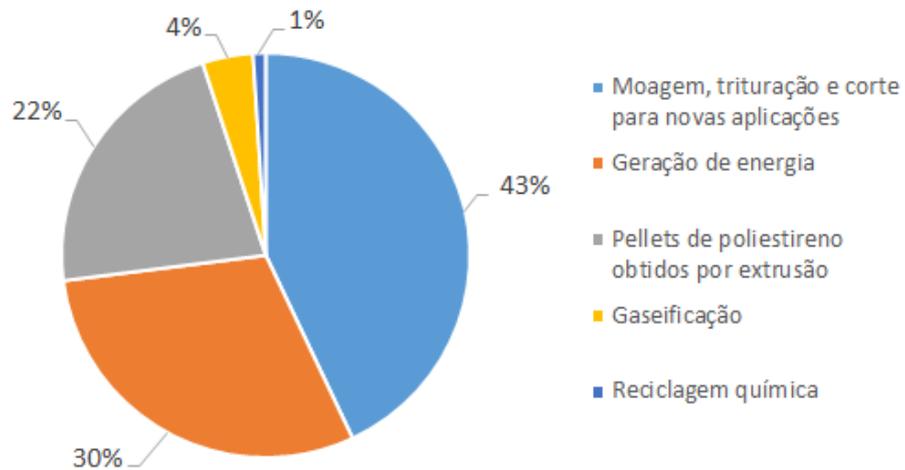
Figura 5 - Taxa de reciclagem de EPS pós-consumo nos EUA (1990-2012)



Fonte: (EPS INDUSTRY ALLIANCE, 2012)

Na Europa Ocidental, em 2002, 90 mil toneladas de EPS foram recicladas, o que equivale a 45% das embalagens de EPS descartadas naquele ano (EUMEPS, 2002a). A Figura 6 ilustra os modos de reuso de EPS na Europa em 2002, que ocorre principalmente com a realização de moagem/trituração/corte para novas aplicações (43% de todo EPS recuperado), a obtenção de pellets de poliestireno por extrusão (22% do EPS recuperado) e recuperação de energia (30% do EPS recuperado) (EUMEPS, 2002a).

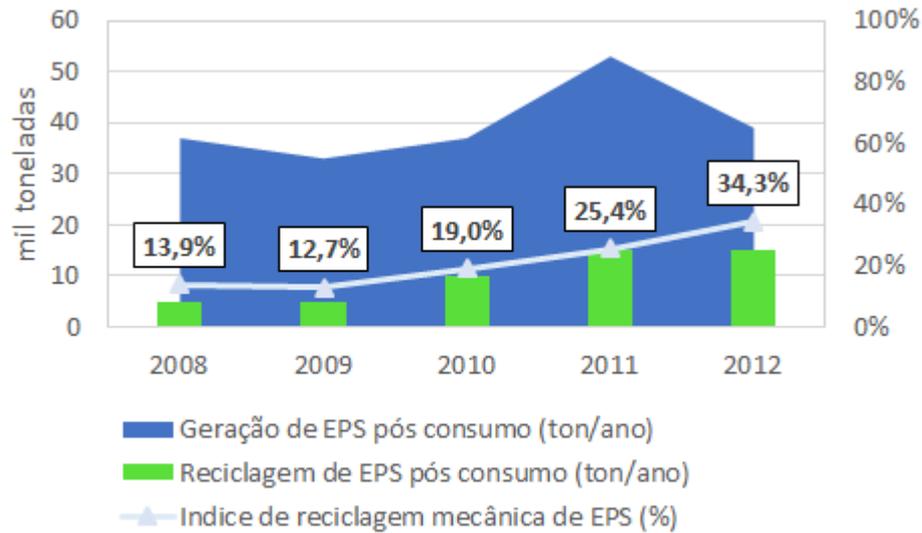
Figura 6 - Destinação de EPS para reuso na Europa (2002)



Fonte: (EUMEPS, 2002a)

Uma pesquisa da Plastivida (2013) mostra que o Brasil reciclou em 2012 34,3% de EPS pós consumo, ou seja, reciclou mecanicamente 13.570 toneladas das 39.340 toneladas de EPS geradas (Figura 7). Nota-se ampla superioridade em termos de volume disponível do resíduo não doméstico em detrimento desse. Os dados mostram que a reciclagem do EPS pós-consumo tem crescido em um ritmo de 25,3% ao ano no Brasil, resultado muito positivo, comparável a outros países desenvolvidos (PLASTIVIDA, 2013).

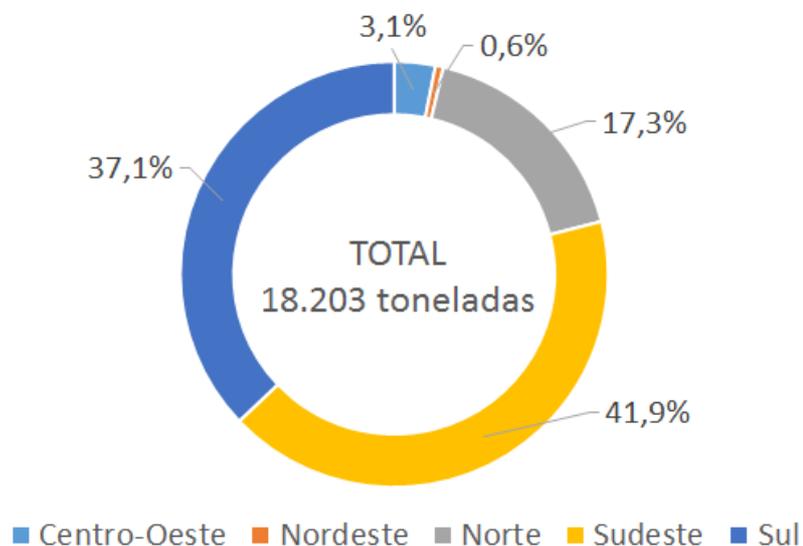
Figura 7 - Reciclagem mecânica de EPS no Brasil (2008-2012)



Fonte: (PLASTIVIDA, 2013)

A Figura 8 apresenta a divisão regional da produção de EPS reciclado no Brasil, onde é possível perceber que a região sudeste é a que tem os maiores volumes de produção de reciclado, condizente com a sua maior capacidade instalada de reciclagem. A região sul também tem uma posição relevante em termos de produção, por conta de melhores condições logísticas – inclusive com iniciativas eficientes de logística reversa – que favorecem um alto nível operacional do parque industrial de reciclagem (Plastivida, 2013).

Figura 8 - Produção de EPS reciclado no Brasil por região em 2012

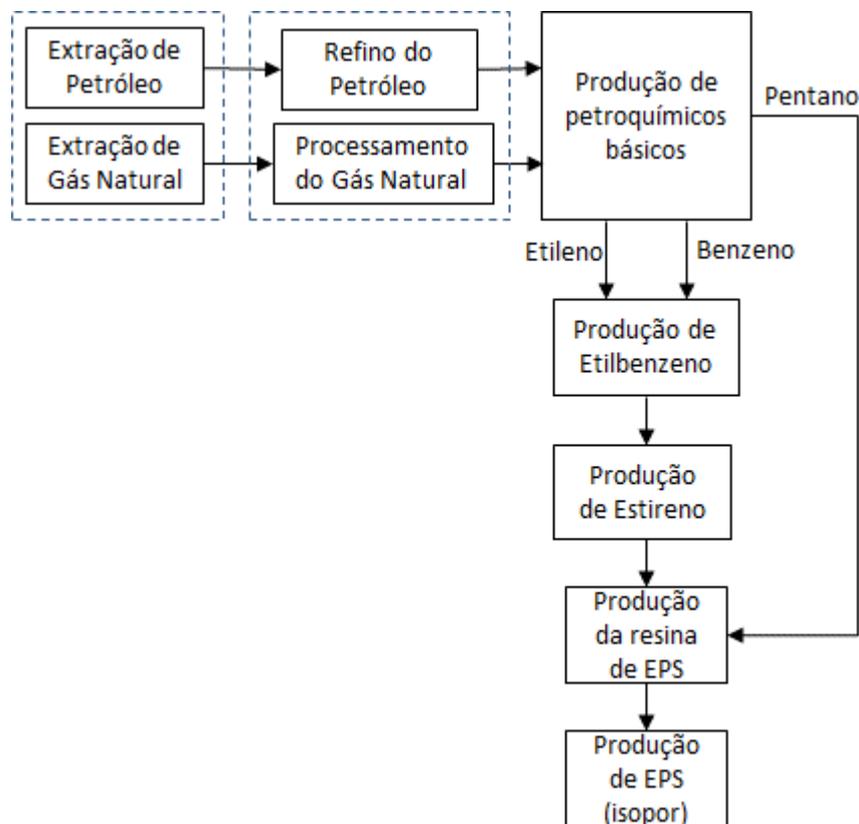


Fonte: (PLASTIVIDA, 2013)

2.4. PROCESSO DE PRODUÇÃO DO EPS VIA ROTA PETROQUÍMICA

Para a obtenção do EPS, a partir de combustíveis fósseis, são necessárias as seguintes etapas: (i) extração do petróleo cru e gás natural; (ii) refino do petróleo e processamento do óleo; (iii) produção de petroquímicos básicos (eteno, benzeno e pentano); (iv) produção do etilbenzeno; (v) produção do monômero de estireno, (vi) produção do poliestireno expansível (resina de EPS) e (vii) produção do poliestireno expandido (EPS) ou isopor (Figura 9).

Figura 9 - Operações para a produção de EPS a partir de combustíveis fósseis



Fonte: Elaboração própria

A seguir, detalha-se cada etapa para a produção da resina de EPS de acordo com as tecnologias praticadas no país, com o intuito de promover um melhor entendimento do processo de produção do polímero em estudo.

2.4.1. Extração, pré-tratamento, transporte do petróleo e do gás natural

O petróleo ou óleo cru é uma mistura de hidrocarbonetos composta de diversos tipos de moléculas formadas por átomos de hidrogênio e carbono e, em menor parte, de oxigênio, nitrogênio e enxofre, combinados de forma variável, conferindo características diferenciadas aos diversos tipos de crus encontrados na natureza (ANP, 2013).

Segundo a Agência Nacional de Petróleo - ANP, em 2012, a produção nacional de petróleo atingiu 754,4 milhões de barris, sendo que a produção realizada no mar (*offshore*) correspondeu a 91,2 % do total com o Rio de Janeiro responsável por 81,6 % dessa produção e a produção em terra (*onshore*) foi de 8,8 %, liderada pelo Rio Grande do Norte. Nesse mesmo ano o Brasil importou 113,19 milhões de barris de petróleo de países como a Nigéria (54 % do total importado) e a Arábia Saudita (22,9 %) e exportou 200,5 milhões de barris para países como Estados Unidos, China e Índia (ANP, 2013).

Depois de ser extraído (*onshore* ou *offshore*) o petróleo bruto é processado para remoção de gás, sedimentos, sais e compostos de enxofre a fim de diminuir o volume de material a ser bombeado para as refinarias e também evitar a possibilidade de corrosão e acúmulo de sedimentos nos dutos. Os processos de tratamento primário consistem em etapas de decantação (para separação de gases e água do óleo) e desidratação (para a redução de água do petróleo para até 1 %) (ALMEIDA, 2006).

Em seguida, o petróleo previamente tratado é encaminhado a refinarias por meio de oleodutos. Quando o petróleo é importado, ele é desembarcado em terminais oceânicos e segue também via oleodutos para as refinarias (ANP, 2013).

O gás natural é uma mistura de hidrocarbonetos leves que, à temperatura ambiente e pressão atmosférica, permanece no estado gasoso. Trata-se de um gás inodoro e incolor, não-tóxico e mais leve que o ar (MMA, 2014). Cerca de 70 % do gás natural é formado pelo gás metano e também fazem parte da sua composição o propano, nitrogênio, oxigênio, etano e enxofre (GÁSTECH, 2014).

Existem duas categorias de classificação do gás natural: associado (GA) e não-associado (GNA). O gás associado se encontra no reservatório, dissolvido no petróleo ou sob a forma de uma capa de gás, portanto, a produção inicial do óleo é privilegiada e o gás é utilizado para manter a pressão do reservatório. O gás não-associado é aquele que, no reservatório, está livre do óleo e da água e sua concentração é predominante na camada rochosa, o que permite a produção direta de gás natural (MMA, 2014).

Como no Brasil, o gás natural produzido é predominantemente de origem associada (cerca de 73 %), ao ser extraído do reservatório, o gás passa por vasos separadores para a retirada de água e separação dos hidrocarbonetos líquidos e, posteriormente passa por uma etapa de remoção de partículas líquidas e sólidas de hidrocarbonetos, denominada depuração (MMA, 2014).

Para a remoção de contaminação por compostos de enxofre, o gás natural passa por uma unidade de dessulfurização a fim de garantir um gás seco e desacidificado, conforme regulamento técnico da ANP (nº001/98). Depois de tratado, o gás é enviado também por meio de gasodutos para as Unidades de Processamento de Gás Natural (UPGN), onde será desidratado e fracionado (MELO, 2005)

2.4.2. Refino do petróleo e processamento do gás natural

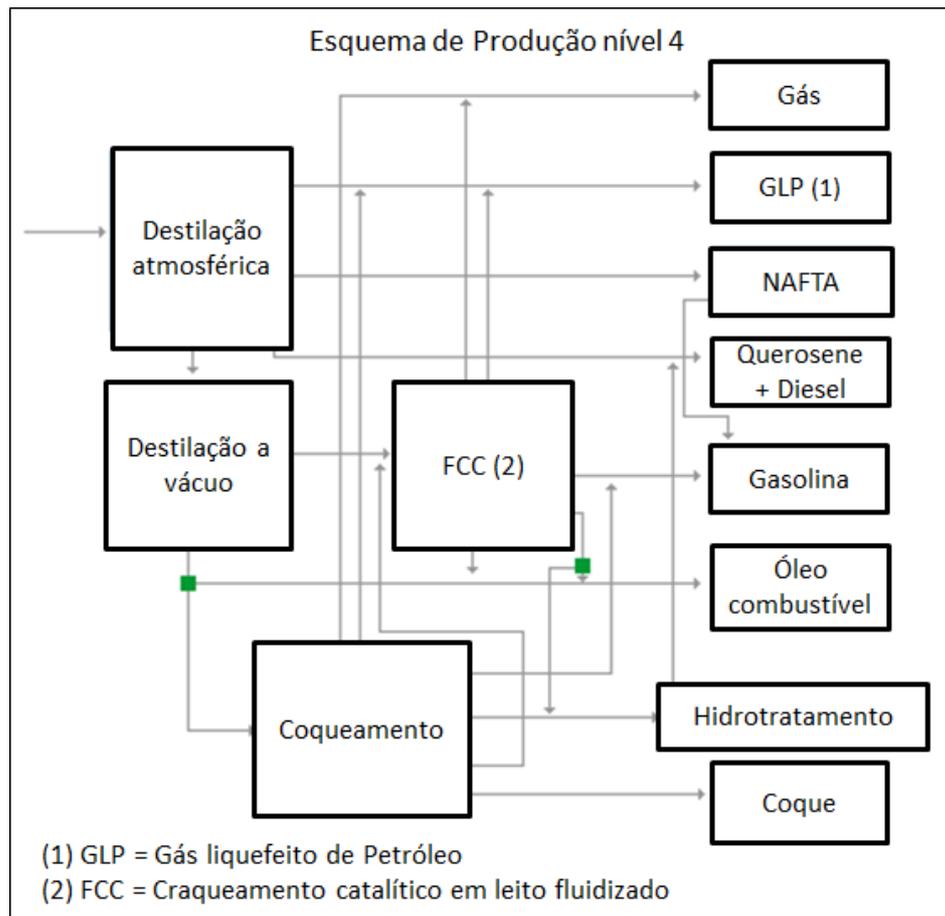
2.4.2.1. Refino do petróleo

O refino de petróleo é um conjunto de processos físicos e químicos necessários para a transformação dessa matéria-prima em derivados energéticos e não energéticos. Cerca de 1,9 milhão de barris foram processados por dia no Brasil em 2012. A refinaria de Paulínia (Replan), localizada no Estado de São Paulo, foi responsável pelo maior volume de carga processada no país:(20,5 % do total) e processou a maior quantidade de petróleo de origem nacional: Em contrapartida, a refinaria de Duque de Caxias (Reduc), localizada no Estado do Rio de Janeiro, foi a refinaria que processou o maior volume de petróleo importado (25,6 % do total importado) (ANP, 2013). A partir do refino do petróleo são obtidos produtos como a nafta e a gasolina, que posteriormente serão processados para a obtenção de eteno, benzeno e pentano, matérias-primas para a fabricação de poliestireno.

De acordo com a ANP (2009), o refino do petróleo pode ser feito através de quatro configurações. A primeira é composta somente de uma unidade de destilação atmosférica, que promove a separação de derivados leves e médios do petróleo. A segunda configuração é composta por unidades de destilação atmosférica, destilação a vácuo e de craqueamento catalítico, para a produção de combustíveis veiculares. A terceira configuração, que permite maior flexibilidade no processamento, é composta por unidades de destilação atmosférica,

destilação a vácuo, craqueamento catalítico e coqueamento, para a produção adicional de coque. A quarta configuração, que é a mais utilizada em refinarias brasileiras atualmente, ilustrada na Figura 10, é composta por unidades de destilação atmosférica, destilação a vácuo, craqueamento catalítico, coqueamento e hidrotreatamento, possibilitando o aumento de produção de óleo diesel em detrimento à gasolina.

Figura 10 - Esquema de refino de petróleo mais utilizado no Brasil



Fonte: (ANP, 2009)

Independentemente da configuração da refinaria, a primeira operação realizada é a dessalinização, seguida do aquecimento do petróleo bruto para a remoção de sais, água, partículas sólidas e metais. O petróleo dessalinizado é então aquecido a 400 °C para o início do fracionamento na torre de destilação atmosférica (GARY; HANDWERK, 2001). Os derivados deste fracionamento são, principalmente, GLP, nafta, querosene e óleo diesel e resíduo atmosférico. As frações, retiradas ao longo da coluna deverão ser tratadas, para se transformarem em produtos finais, ou ser enviadas como matéria-prima para outros processos de refino, que as beneficiarão.

O resíduo atmosférico (fração de alta massa molecular não vaporizada na coluna) é retirado na forma de asfaltos e posteriormente é reaquecido e processado por destiladores a vácuo. A função da unidade de destilação a vácuo é justamente fracionar esse resíduo atmosférico em diesel e gasóleos (leve e pesado), maximizando a produção. Visando rebaixar a temperatura de ebulição do resíduo, este é submetido a pressões subatmosféricas, resultando em vapores (constituídos de vapor d'água, hidrocarbonetos leves não condensáveis e gás sulfídrico) e um resíduo (denominado resíduo de vácuo) composto de hidrocarbonetos de elevado peso molecular, sendo este resíduo enviado para a unidade de coqueamento.

Na unidade de coqueamento, o resíduo de vácuo é introduzido em uma torre fracionadora, separando-se em gasóleo, gasolina de coqueamento, gases combustíveis e coque de petróleo (SZKLO; ULLER, 2008). Os produtos gerados nas unidades de destilação e coqueamento são enviados para o sistema de hidrotreatamento para retirada de impurezas como enxofre, nitrogênio e haletos.

Os gasóleos pesados (do processo de destilação a vácuo e do coqueamento) são enviados para unidades de craqueamento catalítico em leito fluidizado (FCC's), onde são pré-aquecidos (250 – 425 °C), e entram em contato com o catalisador quente (700 °C), gerando produtos mais leves, como gasolina e GLP (PETROBRÁS, 2002).

2.4.2.2. Processamento do gás natural

A Unidade de Processamento de Gás Natural (UPGN) é a instalação industrial que realiza o processamento do gás natural. O objetivo dessa instalação é separar as frações pesadas ou ricas (propano e mais pesados) existentes no gás natural úmido, gerando o chamado gás natural seco ou pobre (metano e etano), gás liquefeito de petróleo (GLP) e gasolina natural. O volume total de gás natural processado no Brasil em 2012 foi de 19,1 bilhões de m³ (52,1 milhões de m³/dia), correspondente a 56,4 % da capacidade total instalada (ANP, 2013).

Na UPGN, são realizadas as separações através de uma sequência de operações, que pode incluir tratamento (para eliminação de teores remanescentes de umidade), compressão, absorção e resfriamento, dependendo do tipo a ser empregado. Os hidrocarbonetos recuperados podem ser estabilizados e separados por fracionamento, para obtenção dos produtos desejados, na própria UPGN ou em outras unidades específicas, tais como as Unidades de Fracionamento de Líquidos (UFL) e de Processamento de Condensado de Gás Natural (UPCGN) (ANP, 2010).

2.4.3. Produção de petroquímicos básicos

Os petroquímicos básicos utilizados para a produção do poliestireno são o eteno, o benzeno e o pentano. As principais rotas para a produção de eteno e benzeno são o craqueamento térmico a vapor e a reforma catalítica. Já o pentano é obtido por destilação fracionada.

O craqueamento térmico é um processo que utiliza calor e pressão para realizar a quebra de grandes moléculas de hidrocarbonetos em moléculas menores e mais leves. Correntes de nafta e gás natural são craqueadas em fornos de pirólise com temperaturas entre 815 e 900 °C e pressão de 2 atm, com rendimento de geração de eteno, em massa, em torno de 30 % (ANTUNES, 2007).

A reforma catalítica é responsável por cerca de 55 % da produção mundial de benzeno (NETZER, 2005). Nesse processo, ocorre a desidrogenação de naftênicos em aromáticos através de três etapas denominadas pré-tratamento, transformação e estabilização. No pré-tratamento, a nafta é misturada com um gás rico em hidrogênio na presença de catalisadores e posteriormente aquecida entre 260 °C e 340 °C para a remoção de impurezas, como gases sulfurados, hidrogenados e oxigenados e metais. Na etapa de transformação, nova carga de gás rico em hidrogênio é inserida no processo e aquecida entre 470 °C e 530 °C para desencadear reações de aromatização (PETROBRÁS, 2002). Na estabilização, o reformado obtido é fracionado em uma torre de estabilização para a formação de benzeno, isoparafínicos, GLP, gás combustível, hidrogênio e coque (ANTUNES, 2007).

O pentano é um hidrocarboneto leve obtido através da destilação fracionada do petróleo ou através do processamento do gás natural, sendo um componente encontrado também na gasolina. Tendo como matéria-prima o petróleo, ele é produzido através de um processo fechado em refinarias ou de instalações petroquímicas. O uso de equipamentos de destilação altamente eficientes permite o isolamento de n-pentano de pureza entre 80 % e até 99 % em peso (EUROPEAN COMMISSION JOINT RESEARCH CENTRE, 2003). Pentano é usado como agente expensor na fabricação de espumas de poliestireno e poliuretano. Pentanos também são utilizados como solventes em cosméticos aerossóis, tintas aerossóis e produtos de cuidado para carros (DOW CHEMICAL COMPANY, 2007).

2.4.4. Produção de etilbenzeno

O etilbenzeno é um líquido incolor, inflamável e com odor semelhante ao da gasolina, utilizado principalmente na produção de estireno (CETESB, 2012). As principais rotas de produção do etilbenzeno são: alquilação de benzeno com eteno, alquilação de tolueno com metanol, transalquilação de dietilbenzeno (ou trietilbenzeno) com benzeno e transalquilação de tolueno (OLIVEIRA et al., 2005)

A rota mais utilizada no país para a produção do etilbenzeno atualmente é a alquilação de benzeno com eteno. Nesse processo, correntes de eteno e benzeno são aquecidas e inseridas em reatores a temperaturas entre 85 °C e 95 °C e pressão atmosférica, com a adição de catalisadores. Como o benzeno é adicionado em excesso, para garantir a conversão completa do eteno, parte dele sofre reações adicionais de alquilação e são produzidos compostos denominados polietilbenzenos. Após sair dos reatores as correntes, compostas por etilbenzeno, polietilbenzenos e benzeno não reagido, são fracionadas em torre de destilação. O benzeno então é reciclado para voltar ao processo, os polietilbenzenos são convertidos em etilbenzeno por transalquilação e o benzeno é encaminhado para o processo de produção do estireno (ANTUNES, 2007).

2.4.5. Produção do estireno

O estireno, um dos produtos mais importantes da indústria química, é um hidrocarboneto aromático não saturado. À temperatura ambiente, é líquido oleoso incolor, que polimeriza com facilidade na presença do oxigênio. A sua fórmula química é $C_6H_5CHCH_2$ (MACIEIRA, 2011).

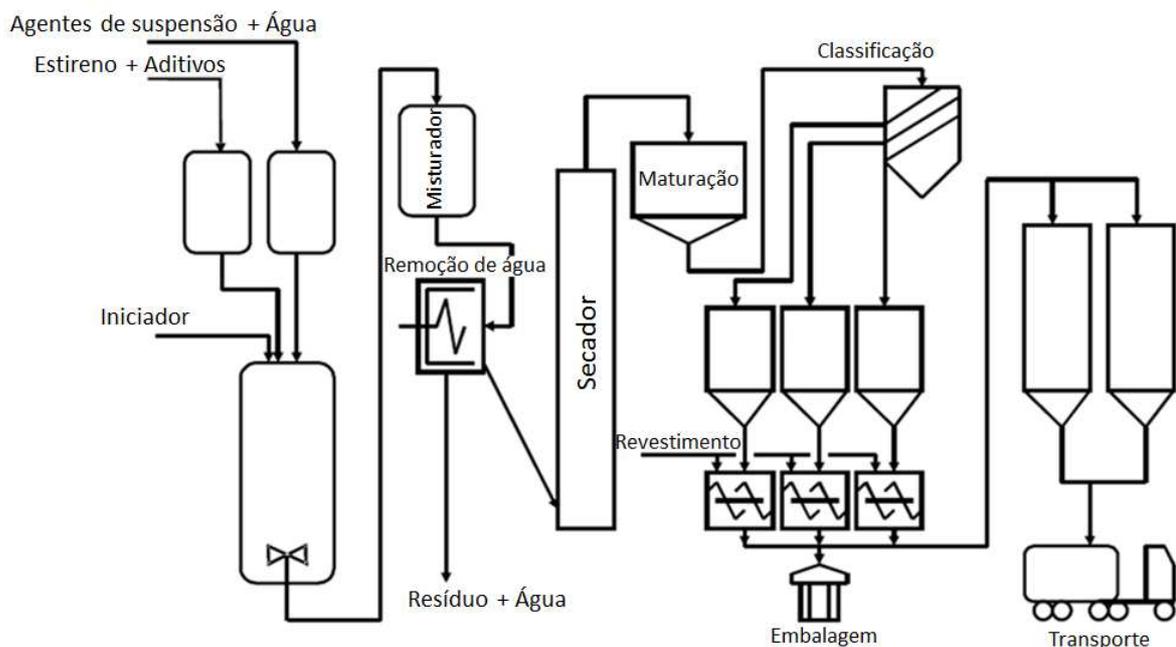
O estireno pode ser obtido a partir do etilbenzeno pela rota petroquímica ou também através do processo para produção do óxido de propeno (PO/SM), no qual o estireno é um subproduto, obtido neste caso a menor custo do que por via petroquímica (MONTENEGRO; SERFATY, 2002). A principal via comercial de obtenção do estireno é a desidrogenação catalítica do etilbenzeno em presença de vapor d'água, através da Equação (1).

2.4.6. Produção da resina de poliestireno expansível (EPS)

Pérolas de poliestireno expansível são produzidas por polimerização em suspensão em fase sólida na presença de um agente de expansão (usualmente pentano). O termo polimerização em suspensão descreve um processo no qual monômeros insolúveis em água são dispersos em gotas usando estabilizadores de suspensão e agitação para produzir partículas poliméricas dispersas (SCHEIRS; PRIDDY, 2003).

O processo de produção de pérolas de EPS é ilustrado na Figura 12. Primeiramente, água e monômero são dispersos em diferentes recipientes antes de iniciar a reação. Nesse momento, a fase aquosa e a fase com o monômero são colocadas no mesmo reator (com razão monômero/água entre 40:60 e 60:40) e então aditivos são adicionados (antes ou durante a polimerização). O reator alimentado é aquecido gradualmente até a temperatura de reação e assim o pentano (agente expensor) é adicionado sob pressão (SCHEIRS; PRIDDY, 2003). Depois da conversão, o reator é resfriado e a suspensão é transferida para um reator com agitação (processo normalmente contínuo). Os próximos passos são a separação das pérolas de EPS da água (por centrífugas ou peneiras rotativas), secagem, peneiramento e revestimento. Finalmente o EPS pode ser embalado e enviado para uso final por fabricantes de poliestireno expandido (isopor).

Figura 12 - Passos para a produção de pérolas de EPS (poliestireno expansível)



Fonte: (SCHEIRS; PRIDDY, 2003)

2.4.7. Produção do poliestireno expandido (EPS)

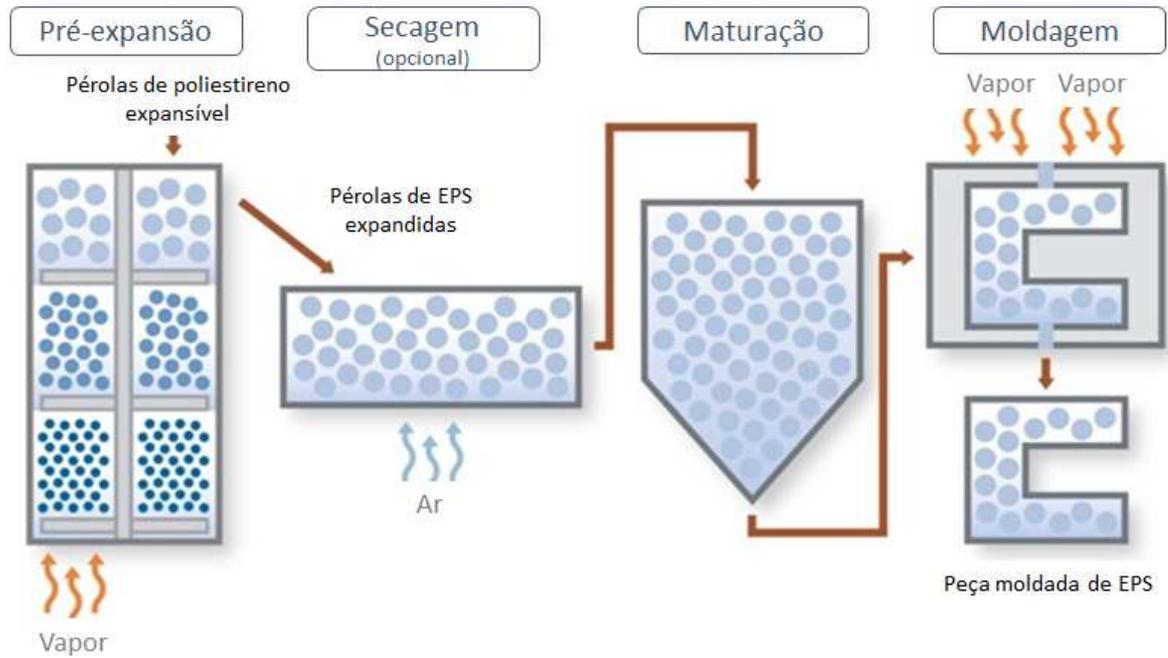
O poliestireno expandido (EPS), popularmente conhecido no Brasil como isopor, é produzido a partir das pérolas da resina de poliestireno expansível (também denominada EPS) através de um processo que ocorre em 3 estágios. No primeiro estágio, as pérolas de EPS são expandidas até 50 vezes seu volume original por vapor aquecido (temperatura cerca de 100 °C) e agitação contínuo (TESSARI, 2006). O processo é realizado em um recipiente fechado (chamado pré-expansor) e a densidade final do EPS é determinada (tipicamente entre 14 e 30 kg/m³) (ABRAPEX, 2008). Então, as pérolas expandidas são resfriadas, secas e enviadas para armazenamento em silos.

O segundo estágio é um processo conhecido como maturação, armazenamento ou envelhecimento. Nesse estágio, as pérolas expandidas contendo até 90 % de ar são estabilizadas por um período de 24 horas (o ar se difunde para o interior das pérolas e o equilíbrio é atingido) (PLASTICS NEW ZEALAND, 2014).

No estágio de moldagem, terceiro estágio de processamento, as pérolas expandidas são transferidas para um molde e aquecidas novamente por introdução de vapor. As pérolas irão expandir novamente, porém, como estão contidas, elas não podem expandir livremente, e criam então pressão interna dentro do molde. Sob essa pressão, as pérolas amolecidas se fundem quando a temperatura correta é atingida. Após a fusão, o molde é resfriado e o EPS moldado é retirado. Blocos grandes de EPS de até 5 metros de comprimento podem ser produzidos. Esses blocos serão então cortados em placas ou folhas de EPS (PLASTICS NEW ZEALAND, 2014).

Na Figura 13, o processo de produção de EPS (isopor) é ilustrado. Pode-se observar que o processo de obtenção de blocos de EPS, a partir de pérolas de poliestireno expansível, é relativamente simples.

Figura 13 - Processo de produção de poliestireno expandido (isopor)

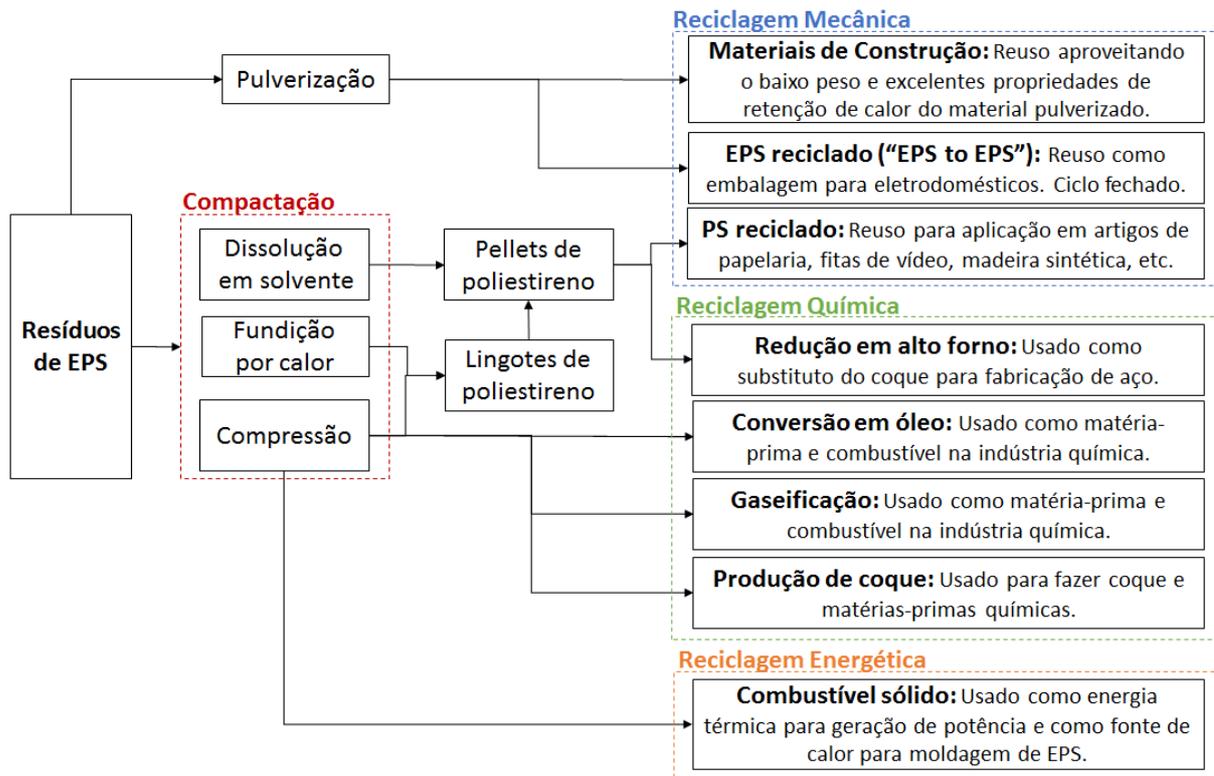


Fonte: (PLASTICS NEW ZEALAND, 2014)

2.5. RECICLAGEM DE EPS

Os processos de reciclagem de plásticos são constantemente classificados em quatro tipos (SPINACÉ; PAOLI, 2005): primária ou re-extrusão, secundária ou mecânica, terciária ou química e quaternária ou energética. Pode-se visualizar os diferentes processos de reciclagem para o EPS, assim como os produtos obtidos através desses tipos de reciclagem na Figura 14.

Figura 14 - Processos de reciclagem do EPS e os produtos obtidos



Fonte: (EPS RECYCLING, 2014)

2.5.1. Estado da arte da reciclagem de EPS

Noguchi et al. (1998) publicaram um dos primeiros estudos sobre a reciclagem de EPS na revista *Packaging Technology and Science*, no qual propôs-se a reciclagem do EPS utilizando d-limoneno, um solvente vegetal natural extraído das cascas de cítricos como a laranja. Através desta técnica foi possível reduzir o volume do EPS para cerca de 1/20 do original sem ocorrer a degradação do polímero, porque o d-limoneno deprime a decomposição oxidativa do PS. Sendo assim, o EPS pôde ser reciclado posteriormente, com quase nenhuma degradação de peso molecular, mantendo suas propriedades mecânicas originais.

Bajdur et al. (2002) conduziram um novo estudo na Polônia que consistia no uso de grupos sulfonados obtidos através da sulfonação de resíduos de EPS com ácido sulfúrico

concentrado, para a produção de polieletrólitos⁵ com propriedades de floculação semelhantes aos polieletrólitos aniônicos comerciais, resultando em um produto com aplicação em processos de tratamento de águas industriais.

Taguchi e Tanaka (2003) apresentaram um trabalho no qual foram feitos testes com EPS reciclado, utilizado como matriz polimérica para formação de um compósito com pós de magnetita e carboneto de silício, visando dar condutividade térmica e magnetização elétrica ao polímero. De acordo com os resultados, foi sugerida a capacidade de controlar a morfologia da partícula de compósito.

Xue et al. (2004) realizaram uma avaliação da reciclagem térmica de resíduos de EPS para obtenção de óleos combustíveis, utilizando α -metilestireno como agente de transferência de cadeia com diferentes peróxidos orgânicos como aceleradores de radicais na decomposição térmica.

Choi e Ohama (2004) publicaram o primeiro artigo sobre o uso de resíduos EPS em argamassas. Neste estudo, os resíduos de EPS foram dissolvidos em estireno, em uma concentração de 40 %. Essas argamassas foram então testadas e como resultado a vida útil foi diminuída, assim como sua resistência à flexão, porém a resistência à compressão aumentou, bem como sua resistência à água quente. Esta pesquisa abriu caminho para pesquisas posteriores de aplicação de resíduos de EPS em concretos, como os estudos publicados por Amianti e Botaro (2008), Hernández-Zaragoza et al. (2013) e Lo Monte, Bamonte e Gambarova (2014), que analisaram as propriedades de concretos contendo resíduos de EPS como aditivo.

Outra aplicação bastante estudada atualmente para resíduos de EPS é a formação de compósitos com madeira e outros materiais. Borsoi, Scienza e Zattera (2013) estudaram um compósito formado por EPS reciclado por trituração e extrusão e cerca de 20% de fibras de curauá. As propriedades mecânicas quase não foram afetadas, porém, a estabilidade térmica do polímero foi aumentada. A adição de fibras de curauá levou a um aumento na resistência à tração, módulo de elasticidade, a rigidez e estabilidade térmica dos compósitos.

Agoua et al. (2013) desenvolveram compósitos de resíduos de EPS com resíduos de madeira e estudaram as propriedades de condutividade térmica desse compósito, que apresentou características que permitem sua utilização como divisórias e forros.

⁵ Polieletrólito é um polímero no qual alguns monômeros são sais de grupos iônicos e não-metálicos. Esses grupos são parcialmente ionizados em solução, o que permite que a cadeia polimérica tenha diversas densidades de carga, conforme a porcentagem de monômeros ionizados na cadeia (SOUSA E SILVA, 2010).

Sendo assim, ficam evidentes as inúmeras aplicações para os resíduos de EPS tanto para produção de novos materiais quanto para a produção de polímeros através da reciclagem, como também para utilização como combustível ou como matéria-prima para produtos químicos.

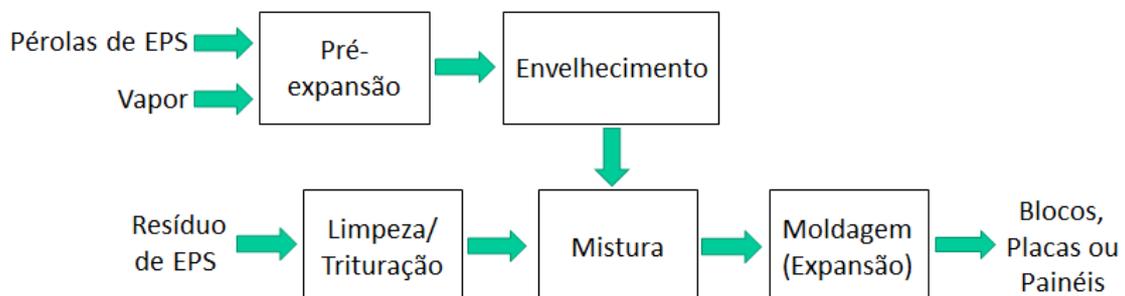
2.5.2. Processos de reciclagem de EPS estudados

Os processos de reciclagem mecânica de EPS estudados são descritos a seguir.

2.5.2.1. Processo de reciclagem por injeção de vapor

A reciclagem de EPS por injeção de vapor é um processo convencional adaptado para receber resíduos de EPS que serão processados juntamente com a matéria-prima virgem pré-expandida. Os resíduos advindos do próprio processo ou de outras empresas, são picados e misturados com os grânulos de EPS pré-expandidos em um tanque de mistura para moldagem subsequente, de acordo com o esquema apresentado na Figura 15. É importante destacar que os resíduos que vêm de outras empresas são resíduos limpos, como por exemplo, resíduos da indústria eletrônica.

Figura 15 - Esquema do processo de reciclagem por injeção de vapor



Fonte: Adaptado de GROTE e SILVEIRA (2003)

A geração de vapor para o processo é realizada através de uma caldeira flamotubular alimentada com óleo BPF 1A, que gera 0,152 kg de vapor saturado por segundo para o processo. Os consumidores diretos desse vapor são o pré-expansor e a bloqueira. (GROTE; SILVEIRA, 2003). O material virgem entra no pré-expansor, que é dotado de um motor elétrico de agitação de 4 hp, onde as pérolas de EPS são pré-expandidas através da inserção de vapor no equipamento. Depois da primeira expansão, o material vai para um tanque de descanso ou maturação, onde fica armazenado para atingir o equilíbrio térmico. Então o material virgem pré-expandido entra em um tanque onde é misturado com resíduos de EPS previamente cortados em pequenos pedaços. Depois de misturado o material vai para a última expansão e moldagem que ocorre na bloqueira. Após essa moldagem os blocos de EPS estão prontos para serem cortados, de acordo com as especificações do cliente. O processo estudado opera em um ciclo aberto, não tendo retorno de condensado para a caldeira. No corte, a potência utilizada é de cerca de 1,1 kW (GROTE; SILVEIRA, 2003).

2.5.2.2. Processo de reciclagem termomecânica

O estudo do processo de reciclagem termomecânica foi iniciado na UNESP através de uma dissertação de mestrado na área de Engenharia de Materiais para verificação das propriedades do poliestireno (PS) advindo da reciclagem do EPS para aplicação em placas de circuitos eletrônicos (SCHMIDT, 2012). Depois de concluído o primeiro estudo com resultados que indicam que o EPS reciclado pode ser utilizado para a confecção de placas de circuitos eletrônicos, neste trabalho, são avaliados o consumo de energia e consequentes emissões de poluentes para a realização desse modo de reciclagem. Os resíduos de EPS utilizados são aqueles advindos de embalagens utilizadas, por exemplo, em eletrônicos e descartadas após um único uso.

Na Figura 16, é possível observar como o processo de reciclagem termomecânica se inicia com a trituração e limpeza dos resíduos de EPS que posteriormente são aglomerados para a retirada do ar. A próxima etapa é a homogeneização do resíduo, que agora é constituído apenas de PS (poliestireno) para posterior moldagem por compressão e obtenção das placas de PS ou moagem para obtenção de PS granulado. As placas são feitas de material 100 % reciclado, o que poupa matéria-prima virgem e proporciona uma alternativa aos materiais convencionais

utilizados para esta aplicação (SCHMIDT, 2012). O processo foi realizado em escala de laboratório e o consumo de energia de cada equipamento utilizado foi calculado a partir da potência nominal do equipamento em relação à quantidade de EPS processada.

Figura 16 - Processo de reciclagem termomecânica de EPS



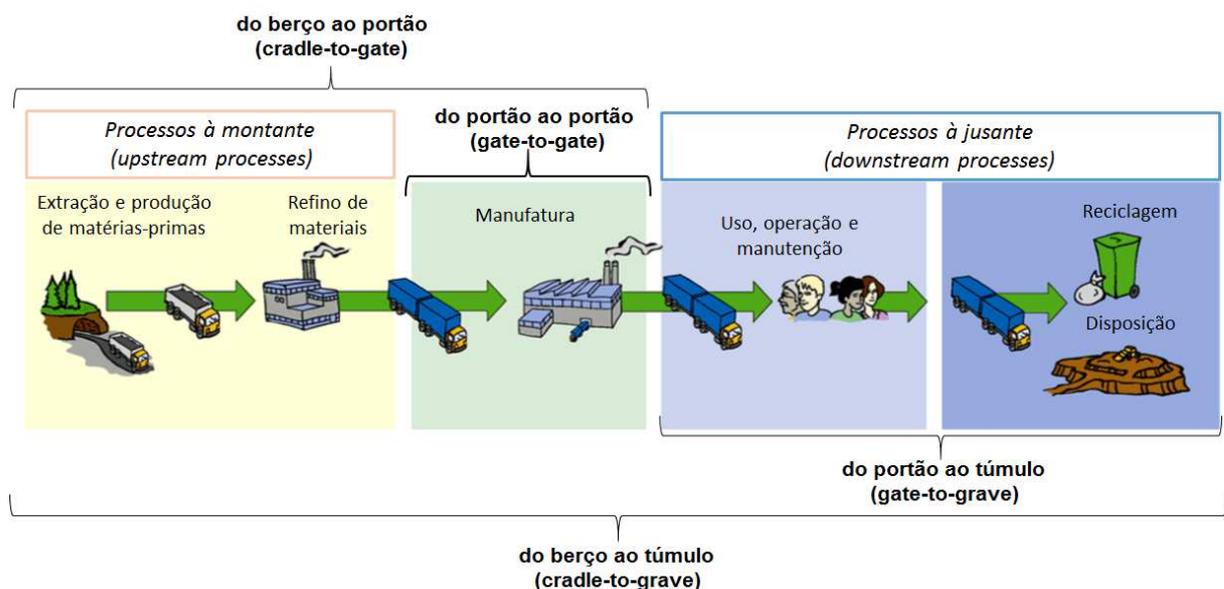
Fonte: Adaptado de SCHMIDT (2012)

3. AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA

A Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) é uma ferramenta que fornece uma avaliação sistemática dos aspectos ambientais e os potenciais impactos de um produto ou de um sistema de serviço ao longo da sua vida (desde a aquisição de matérias-primas, passando pela produção, utilização e disposição final) (ABNT NBR ISO 14040,2009). Estudos de ciclo de vida podem ser realizados, considerando diferentes fronteiras, como ilustrado na Figura 17:

- “do berço ao portão” (*cradle-to-gate*): da extração dos recursos até o portão da fábrica;
- “do portão ao portão” (*gate-to-gate*): somente o processo de manufatura é considerado;
- “do portão ao túmulo” (*gate-to-grave*): inclui as fases de distribuição, uso e disposição;
- “do berço ao túmulo” (*cradle-to-grave*): da extração dos recursos até a disposição final;

Figura 17 - Etapas do ciclo de vida de um produto ou serviço



Fonte: Adaptado de EPD (2008)

Processos que antecedem a manufatura do produto, ou seja, da extração da matéria-prima até o envio para a manufatura, são denominados processos à montante (upstream processes) e processos que sucedem a manufatura até a disposição final do produto são denominados processos à jusante (downstream processes).

3.1. HISTÓRICO E NORMALIZAÇÃO

O primeiro estudo público nesse sentido data de 1965, e foi feito pela Coca-Cola com o intuito de selecionar a embalagem de refrigerantes mais adequada do ponto de vista ambiental e com melhor desempenho com relação à preservação dos recursos naturais. Esse estudo ficou conhecido como *Resource and Environmental Profile Analysis* (REPA) e nele, foram quantificados o uso de recursos naturais e as emissões de poluentes (SANTOS et al., 2011).

Em 1974, durante a realização de estudos para a Agência de Proteção Ambiental Americana (EPA), o Midwest Research Institute (MRI) aprimorou a metodologia REPA e criou o precursor do que hoje se conhece como Avaliação do Ciclo de Vida (MOURAD; GARCIA; VILHENA, 2002). Em 1984, por solicitação do Ministério do Meio Ambiente da Suíça, o instituto Swiss Federal Laboratories for Testing and Research (EMPA) realizou um estudo sobre materiais de embalagem aplicando uma análise do impacto potencial das emissões do processo. Este estudo foi publicado na forma de um banco de dados contendo informações sobre o ciclo de vida de uma série de materiais (MOURAD; GARCIA; VILHENA, 2002). Em 1985 a Comunidade Europeia recomenda o método como o mais adequado para o monitoramento dos consumos energéticos e de materiais nas empresas e partir daí surge a denominação “*Avaliação do Ciclo de Vida*”.

Entre 1990 e 1993 a *Society of Environmental Toxicology and Chemistry* (SETAC) organizou conferências que resultaram na primeira padronização da metodologia de ACV, um documento denominado *SETAC Guidelines for Life Cycle Assessment: a Code of Practice*. (MOURAD; GARCIA; VILHENA, 2002). Em 1996, a *International Organization for Standardization* (ISO), uma federação mundial de organismos nacionais de normalização, padronizou as práticas e condutas de realização de estudos de ACV dentro da série ISO 14040 (UNEP, 2011).

Atualmente a ISO tem as seguintes normas vigentes sobre avaliação do ciclo de vida:

- ISO 14040:2006 Environmental management -- Life cycle assessment -- Principles and framework.
- ISO 14044:2006 Environmental management -- Life cycle assessment -- Requirements and guidelines.
- ISO/TR 14047:2012 Environmental management -- Life cycle assessment -- Illustrative examples on how to apply ISO 14044 to impact assessment situations.

- ISO/TS 14048:2002 Environmental management -- Life cycle assessment -- Data documentation format.
- ISO/TR 14049:2012 Environmental management -- Life cycle assessment -- Illustrative examples on how to apply ISO 14044 to goal and scope definition and inventory analysis.
- ISO/TS 14071:2014 Environmental management -- Life cycle assessment -- Critical review processes and reviewer competencies: Additional requirements and guidelines to ISO 14044:2006.
- ISO/TS 14072:2014 Environmental management -- Life cycle assessment -- Requirements and guidelines for organizational life cycle assessment.

No Brasil, as normas da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) vigentes atualmente são as seguintes:

- ABNT NBR ISO 14040:2009 Gestão ambiental - Avaliação do ciclo de vida - Princípios e estrutura.
- ABNT NBR ISO 14044:2009 Gestão ambiental - Avaliação do ciclo de vida - Requisitos e orientações.
- ABNT ISO/TR 14049:2014 Gestão ambiental – Avaliação do ciclo de vida — Exemplos ilustrativos de como aplicar a ABNT NBR ISO 14044 à definição de objetivo e escopo e à análise de inventário.

3.2. APLICAÇÕES, USOS E LIMITAÇÕES

Desde o início da década de 1990, a ACV tem sido utilizada em vários países para identificar oportunidades de melhoria de desempenho ambiental, comparar o desempenho ambiental de produtos, analisar as estratégias de gestão de resíduos e reciclagem de materiais e comparar com outras estratégias de gestão de resíduos (BJÖRKLUND; FINNVEDEN, 2005) e para projeto de novos produtos e processos.

A metodologia da ACV é amplamente utilizada nos setores industrial, empresarial e governamental, fornecendo dados quantitativos de desempenho ambiental para a verificação de atendimento de critérios ambientais estabelecidos.

De acordo com a norma ABNT NBR ISO 14040 (2009), a ferramenta de ACV apresenta incertezas diretamente relacionadas a seu aspecto metodológico, devido a subjetividade das

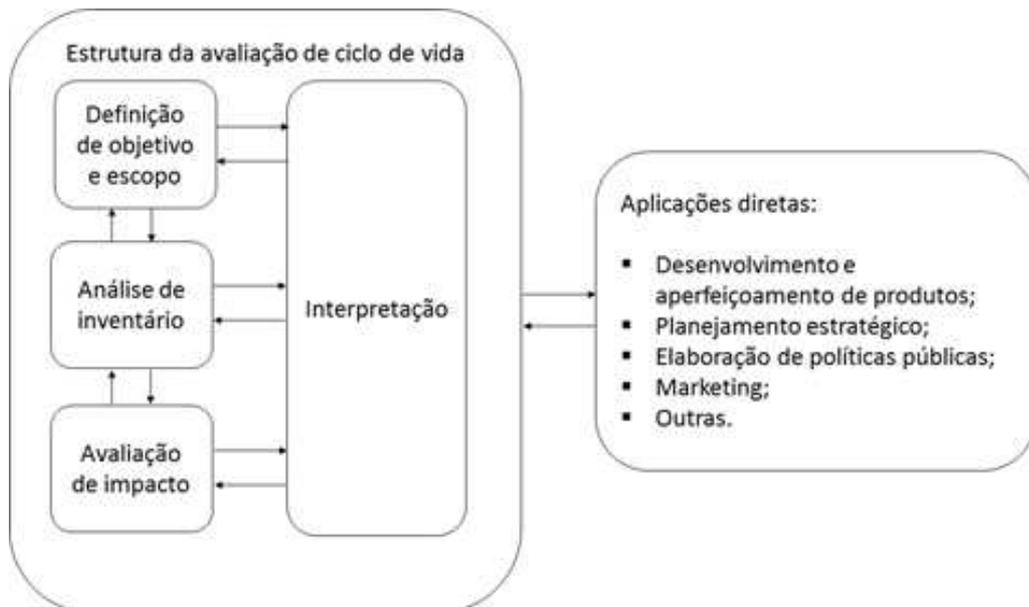
decisões aplicadas aos estudos, por exemplo, na definição dos limites do sistema, das categorias de impacto ou na origem dos dados. Logo, a inexistência de critérios universais para a padronização das terminologias, métodos de execução e formato de dados podem ocasionar distorções nos resultados dos estudos (SILVA; KULAY, 2006).

Outra limitação é com relação à ausência de dados de apoio. Alguns países criaram bancos de dados de ACV, porém, muitas vezes estas informações não estão uniformizadas, algumas vezes são obsoletas, incomparáveis ou de qualidade desconhecida (RIBEIRO, 2009).

3.3. METODOLOGIA PARA CONDUÇÃO DE ESTUDOS DE ACV

De acordo com a ABNT NBR ISO 14040 (2009) um estudo de ACV é conduzido através da realização de quatro etapas: (i) definição de objetivo e escopo, (ii) análise de inventário, (iii) avaliação de impactos ambientais e, (iv) interpretação dos resultados (Figura 18). Algumas das aplicações diretas de estudos de ACV são no desenvolvimento e aperfeiçoamento de produtos, no planejamento estratégico e na elaboração de políticas públicas (ABNT NBR ISO 14040, 2009).

Figura 18 – Estrutura de um estudo de ACV



Fonte: (ABNT NBR ISO 14040, 2009)

3.3.1. Definição de objetivo e escopo na ACV

Esta etapa tem por finalidade apresentar o objeto do estudo em questão e os motivos para seu desenvolvimento. A definição clara do objetivo é fundamental para o bom desenvolvimento de um estudo de ACV. Segundo a ABNT NBR ISO 14040 (2009), catorze elementos devem ser definidos neste momento do estudo, são eles:

- *Função do sistema de produto*: Estabelecimento do uso e função do objeto em análise.
- *Sistema de Produto*: Conjunto de processos elementares a partir do qual será realizada a função. Os processos elementares são conectados entre si por fluxos materiais e energéticos e são compostos por entradas sem transformação antrópica ou por derivados de outros processos elementares (produtos).
- *Unidade Funcional*: De acordo com o escopo da ACV, quantifica a função ao produto, sendo um valor arbitrário que será utilizado como base de cálculo para a quantificação de entradas e saídas do sistema.
- *Fluxo de Referência*: Trata-se da quantidade de produto necessária para atender a unidade funcional previamente estabelecida, sendo então o resultado da multiplicação da unidade funcional pelo desempenho técnico.
- *Fronteiras do Sistema de Produto*: Delimita a abrangência do estudo, através da definição das fronteiras (geográfica, temporal e de bens de capital) que irão delimitar o conjunto de processos elementares que atendem à função definida. Estas fronteiras geralmente são representadas através de diagrama de blocos do sistema.
- *Critérios de exclusão de dados*: Seleção de aspectos ambientais a serem considerados em cada processo elementar que compõe o sistema. Os critérios e exclusão podem ser baseados em representatividade mássica ou energética de fluxos (enfoque quantitativo) ou em premissas de relevância ambiental (enfoque qualitativo).
- *Procedimentos de alocação*: Consiste na distribuição de contribuições dos fluxos (e os impactos ambientais associados a estes) entre os diferentes produtos. Os procedimentos de alocação são realizados em três cenários: (i) quando um único processo resulta em vários produtos (ex. refinarias); (ii) quando sistemas são compartilhados por diferentes processos (ex. sistemas de tratamento de efluentes

em petroquímicas); e (iii) quando materiais são reciclados em sistemas de produtos diferentes (BAUMANN; TILLMAN, 2004).

- *Requisitos de Qualidade*: Especificação das características dos dados necessários ao estudo, de acordo com os objetivos estabelecidos. Essas características são: área geográfica, período de tempo, tecnologias envolvidas, fontes de dados (representatividade, precisão e incertezas) e capacidade de reprodução dos métodos utilizados.
- *Metodologia para a avaliação de impacto*: Definição das categorias de impacto, assim como os indicadores e o modelo de avaliação de impactos ambientais que serão utilizados no estudo de ACV.
- *Limitações*: Conforme descrito no item 3.2.
- *Análise Crítica*: Verificação da satisfação dos requisitos adotados quanto à metodologia, os dados e os resultados.

Nesta fase inicial do estudo, deve-se descrever também as eventuais suposições propostas para o estudo de ACV.

3.3.2. Análise de inventário do ciclo de vida (ICV)

Esta etapa consiste na coleta de dados a fim de quantificar os aspectos ambientais do ciclo de vida em estudo. Sendo assim, o primeiro procedimento realizado é a coleta de dados, que podem ser primários (dados obtidos em campo) ou secundários (dados obtidos da literatura), e a conversão desses dados em fluxos de entrada de matéria-prima e energia para cada um dos processos elementares e de saída para o meio ambiente. Para facilitar a coleta de dados, devem ser feitos fluxogramas de processo e a elaboração de mecanismos para a coleta e registro dos dados.

Os dados quantitativos e qualitativos podem ser selecionados a partir da aplicação de critérios de exclusão de dados, de acordo com a ABNT NBR ISO 14044 (2009). Nesta etapa, também devem ser incorporados os critérios de alocação e a análise de sensibilidade.

3.3.3. Avaliação de impactos ambientais do ciclo de vida (AICV)

A etapa de Avaliação de Impactos Ambientais do Ciclo de Vida (AICV) visa analisar a magnitude e significância dos impactos ambientais potenciais (sobre o meio ambiente e o ser humano) com relação ao atendimento da função exercida pelo produto, processo ou serviço e é composta por elementos obrigatórios e opcionais.

3.3.3.1. Seleção das categorias de impacto na AICV

A seleção das categorias de impacto deve ser realizada de acordo com as considerações feitas durante as fases de objetivo e escopo e com base nos resultados do inventário, visando os aspectos ambientais mais relevantes para o estudo. Nesta fase do estudo, também devem ser definidos os indicadores ambientais e os modelos de caracterização que serão utilizados.

Indicadores são estabelecidos para garantir uma medida comum e científica para a conversão dos valores dos aspectos ambientais, para a posterior realização da quantificação dos resultados das categorias de impacto. Dois tipos de indicadores são utilizados para a avaliação de impacto: (i) indicadores intermediários (midpoints) e (ii) indicadores finais (endpoints). Os indicadores *midpoint* analisam os efeitos primários diretos ocasionados pelo consumo e disposição de um determinado aspecto ambiental, como por exemplo potencial de aquecimento global, depleção de recursos naturais, etc.; que são avaliações menos complexas. Os indicadores *endpoints* avaliam os efeitos finais da cadeia de causa e efeito, por exemplo, saúde humana e meio ambiente.

As categorias de impacto comumente utilizadas em estudos de ACV são as seguintes: Acidificação, Eutrofização, Mudanças Climáticas, Depleção Abiótica, Depleção da Camada de Ozônio, Toxicidade Humana, Ecotoxicidade Terrestre e Formação Fotoquímica de Ozônio.

3.3.3.2. Métodos de avaliação de impactos ambientais na AICV

Na etapa de AICV, é realizado o agrupamento das informações sobre os aspectos ambientais quantificados no inventário. Este agrupamento é realizado a partir do uso de

métodos já desenvolvidos, que são encontrados na literatura. Na Tabela 1 são apresentados os principais métodos de avaliação de impactos ambientais identificados na literatura.

Tabela 1 - Principais métodos de AICV

<i>País</i>	<i>Nome</i>	<i>Detalhamento</i>
Canadá	LUCAS	Bulle et al. (2005)
Dinamarca	EDIP	Wenzel et al. (1997)
Estados Unidos	TRACI	Bare et al. (2003)
Holanda	CML	Guinée (2001)
Holanda / Suíça	Eco-Indicator99	Goedkoop et al. (2000)
Japão	LIME	Itsubo e Inaba (2003)
Japão	JEPIX	Miyazaki et al. (2003)
Suécia	EPS	Steen (1999)
Suíça	IMPACT 2002+	Jolliet et al. (2003)
Holanda	ReCiPe	Goedkoop et al. (2013)
Suíça	Ecopoints	Brand et al. (1998)
Alemanha	CED	VDI-Richtlinien (1997)
Suíça	CExD	Boesch et al. (2007)
EUA	IPCC 2013	IPCC (2013)

Fonte: Adaptado de Silva (2012)

3.3.3.3. Classificação na AICV

Nesta etapa, é realizada a correlação qualitativa dos dados do inventário (ICV) às categorias de impacto. Sendo assim, os fluxos elementares são associados a um indicador *midpoint* que posteriormente será ordenado em indicadores *endpoints*.

Cada fluxo de entrada e saída dos processos elementares, com impactos independentes, pode ser contabilizado integralmente mais de uma vez, porém quando um único aspecto contribui para categorias dependentes, deve-se usar mecanismos distributivos (ABNT NBR ISO 14040, 2009).

3.3.3.4. Caracterização na AICV

A etapa de caracterização visa correlacionar quantitativamente os dados obtidos no inventário (ICV). Esta quantificação é realizada através da conversão dos dados do ICV para

unidades comuns e a agregação dos dados convertidos dentro da mesma categoria de impacto. Através de fatores de caracterização, são gerados resultados numéricos do indicador (ABNT NBR ISO 14044, 2009). Desta forma, é obtido o *Perfil de Impacto Ambiental*, última atividade obrigatória da fase de AICV.

3.3.3.5. Normalização, agrupamento e ponderação na AICV

Entre os elementos opcionais da Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida (AICV) estão a normalização, o agrupamento e a ponderação que podem ser aplicados ao estudo desde que seu uso seja consistente e transparente (ABNT NBR ISO 14044, 2009).

- *Normalização*: A normalização é o cálculo da magnitude dos resultados dos indicadores de categoria com relação a alguma informação de referência. Seu objetivo é auxiliar no entendimento da magnitude relativa de cada indicador do sistema (ABNT NBR ISO 14040, 2009). É um elemento opcional que pode auxiliar na verificação de inconsistências, fornecer informações sobre a significância relativa dos indicadores e preparar para procedimentos adicionais como: agrupamento, ponderação ou interpretação do ciclo de vida. Com este procedimento um resultado do indicador é transformado pela divisão deste por um valor de referência selecionado. Como exemplo de valores de referência, têm-se: entradas e saídas locais para uma determinada área; entradas e saídas locais para uma determinada área em base per capita; entradas e saídas em um cenário de linha-base.
- *Agrupamento*: O agrupamento consiste na reunião de categorias de impacto em um ou mais conjuntos, conforme pré-definido no objetivo e escopo, e pode envolver agregação ou hierarquização (ABNT NBR ISO 14040, 2009). São dois os procedimentos opcionais de agrupamento possíveis: (i) agrupar as categorias de impacto em uma base nominal (ex: escala espacial local, regional ou global) e (ii) classificar as categorias de impacto de acordo com uma hierarquia (ex: alta, baixa ou média prioridade).
- *Ponderação*: Processo de conversão dos resultados de indicadores de diferentes categorias de impacto utilizando fatores numéricos baseados em escolha de valores e pode incluir a agregação dos resultados ponderados de indicadores. Este

é um elemento opcional com dois procedimentos possíveis: (i) converter os resultados dos indicadores ou resultados normalizados com base em fatores de ponderação selecionados ou (ii) agregar os resultados convertidos dos indicadores ou resultados normalizados entre as diferentes categorias de impacto (ABNT NBR ISO 14040, 2009).

3.3.4. Interpretação dos resultados na ACV

A fase de interpretação de resultados tem como objetivo combinar, resumir e discutir as constatações das fases anteriores. Nesta fase, são identificados os temas de maior relevância ambiental e os resultados são avaliados para o estabelecimento de recomendações e conclusões. Sendo assim, são desenvolvidas prioridades e são feitas avaliações identificando oportunidades para a redução do ônus ambiental (PRADO, 2007).

Nesta fase também, deve ser destacada a minimização do uso de materiais ou processos conhecidos por causar os principais pontos críticos de impacto ambiental levantados, e o empenho em empregar estratégias de redução, reutilização, reciclagem e recuperação de resíduos (KNIGHT, 1996).

3.4. ACV E PROCESSOS DE RECICLAGEM

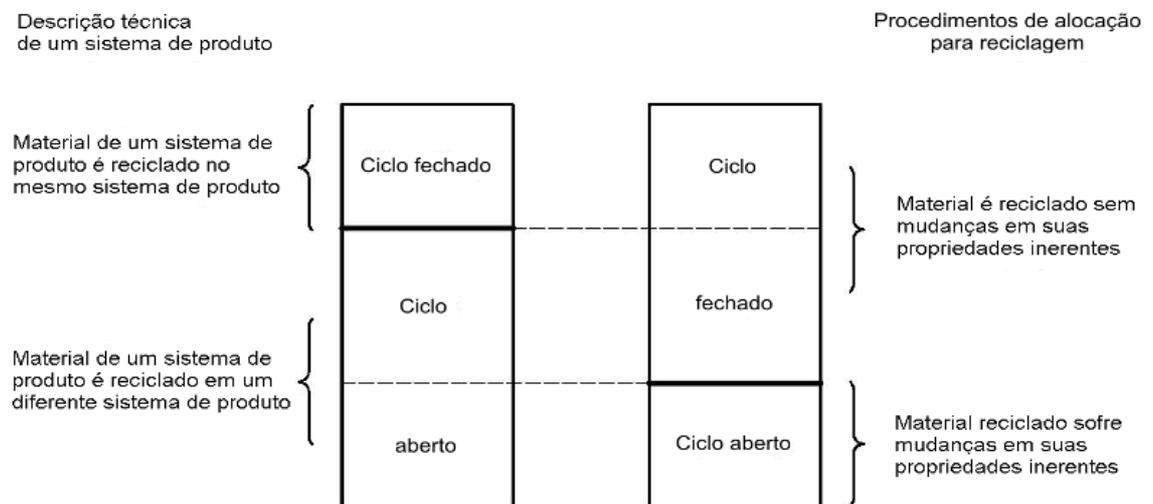
Conforme citado anteriormente, estudos de ACV em processos multifuncionais devem ser elaborados de maneira a alocar os aspectos ambientais, se necessário, de forma apropriada para que reflitam os verdadeiros impactos de cada entrada e saída do sistema. Para que a alocação em processos de reciclagem seja feita de forma correta, deve-se conhecer o tipo de ciclo em estudo, a norma ABNT NBR ISO 14044 (2009) define os processos de reciclagem em dois tipos: ciclo aberto e ciclo fechado:

- *Reciclagem em ciclo fechado*: Um processo de reciclagem é considerado em ciclo fechado quando o material de um sistema de produto é reciclado no mesmo sistema, ou seja, o material é reciclado sem mudanças em suas propriedades

inerentes. Nesse tipo de reciclagem, não é necessário nenhum processo de alocação, visto que os limites do sistema são mantidos. Um exemplo clássico de reciclagem em ciclo fechado é a reciclagem de latas de bebidas feitas em alumínio, que são reutilizadas na mesma função.

- *Reciclagem em ciclo aberto*: A reciclagem em ciclo aberto consiste em reciclar o material de um sistema de produto em um sistema diferente, extrapolando os limites do sistema em estudo. Quando um material é reciclado fora do sistema em estudo, mas não sofre mudanças em suas propriedades inerentes, esse tipo de reciclagem em ciclo aberto pode ser tratado como reciclagem em ciclo fechado (Figura 19). Porém, se as propriedades inerentes do material são alteradas, a alocação deve ser realizada baseada no valor físico, econômico ou no número de usos do material reciclado (ABNT NBR ISO 14.044, 2009).

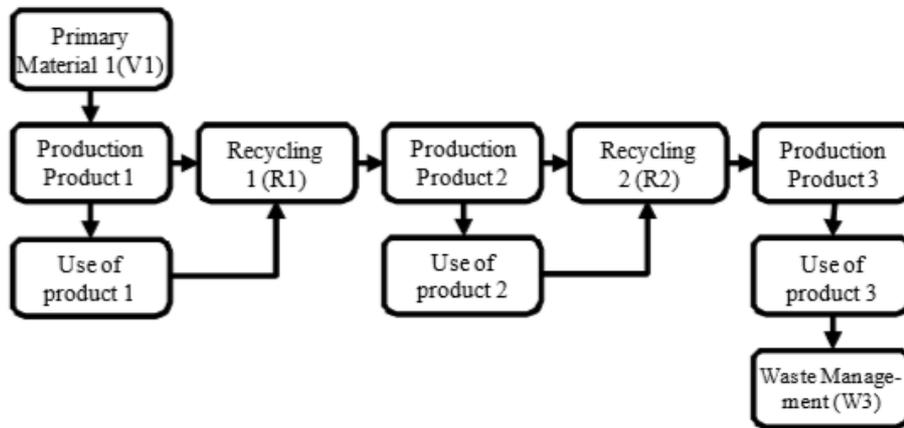
Figura 19 – Sistema de produto x alocação para reciclagem



Fonte: (ABNT NBR ISO 14.044, 2009)

Ao longo dos anos diferentes métodos de alocação para reciclagem em ciclo aberto foram desenvolvidos. De acordo com um levantamento feito por Ramírez (2009), cerca de 24 métodos de alocação para a reciclagem são descritos na literatura. Entre eles, os mais utilizados são: (i) método cut-off, (ii) método de perda da qualidade, (iii) método ciclo fechado, (iv) método 50/50 e (v) método da substituição. Na Tabela 2 pode-se observar a descrição e fórmula de cada método, baseando-se no ciclo de vida em cascata envolvendo a reciclagem em ciclo aberto, descrito por Ekvall e Tillman (1997), de acordo com a Figura 20.

Figura 20 – Ciclo de vida em cascata – ciclo aberto para 3 ciclos de vida.



Fonte: (EKVALL; TILLMAN, 1997)

Tabela 2 – Descrições e fórmulas para diferentes métodos de alocação na reciclagem.

<i>Método</i>	<i>Descrição</i>	<i>Fórmula</i>
Cut-off	Cargas causadas diretamente pelo produto são atribuídas a esse produto.	$L1 = V1, L2 = R1, L3 = R2 + W3$
Perda de qualidade	Atribuição de carga aos produtos em relação a perda de qualidade em cada etapa.	$L_i = \frac{Q_i}{\sum_{i=1}^n Q_i} \times (V1 + R1 + R2 + W3)$
Ciclo fechado	Aplicável a materiais que não apresentam perda de qualidade significativa quando reciclados.	$L1 = L2 = L3 = \frac{V1 + (R1 + R2) + W3}{n}$
50/50	Produção de material virgem e tratamento de resíduos são alocados para os primeiros e últimos produtos em proporções iguais.	$L1 = \frac{V1+R1+W3}{n-1},$ $L2 = \frac{R1+R2}{n-1}, \quad L3 = \frac{V1+R2+W3}{n-1}$
Substituição	Material reciclado substitui o primário; constitui perda de material e cargas de reciclagem.	$L1 = (100\% - r\%) \times (R1) + r\% \times (V1 + W3)$

L é a carga do ciclo de vida do produto, Q_i é a qualidade do material (índices de qualidade podem ser calculados usando dados de preços de mercado para os materiais primários e resíduos), n é o número de ciclos de vida, e r é a quantidade de material primário necessária para a produção do material secundário levando em conta perda de material no processo de reciclagem. As demais variáveis são descritas na figura 20.

Fonte: (EKVALL; TILLMAN, 1997)

3.5. SOFTWARES E BANCOS DE DADOS PARA ESTUDOS DE ACV

A complexibilidade da condução de estudos de ACV tem levado ao desenvolvimento de softwares e bancos de dados que objetivam aumentar a confiabilidade desses estudos. Bancos de dados têm sido criados por instituições públicas e privadas de diversos países (Tabela 3) com o intuito disponibilizar bibliotecas de inventários com valores de cargas ambientais associadas a ciclo de vida de produtos, e também bibliotecas de métodos de avaliação de impacto. Atualmente, o Brasil ainda não possui nenhum banco de dados de ACV próprio, ainda assim, alguns bancos de dados como o Ecoinvent disponibilizam alguns dados de processos elementares brasileiros.

Tabela 3 – Principais bancos de dados para estudos de ACV.

<i>Nome</i>	<i>Website</i>	<i>Cobertura geográfica</i>
Australian Life Cycle Inventory Data Project	http://www.cfd.rmit.edu.au/programs/life_cycle_assessment/life_cycle_inventory	Austrália
BUWAL 250	http://www.umweltschweiz.ch/buwal/eng/	Suíça
Canadian Raw Materials Database	http://crmd.uwaterloo.ca/	Canadá
DuboCalc	http://www.rws.nl/rws/bwd/home/www/cgibin/index.cgi?site=1&doc=1785	Holanda
Dutch Input Output Ecoinvent	www.pre.nl	Holanda
EDIP	www.ecoinvent.ch	Global/Europa/Suíça
Franklin US LCI	www.lca-center.dk	Dinamarca
German Network on Life Cycle Inventory Data	www.pre.nl	EUA
IVAM LCA Data	www.lci-network.de	Alemanha
Japan National LCA Project	www.ivam.uva.nl	Holanda
LCA Food	http://www.jemai.or.jp/english/lca/project.cfm	Japão
SPINE@CPM	www.lcafood.dk	Dinamarca
Swiss Agricultural Life Cycle Assessment Database (SALCA)	www.globalspine.com	Global
US LCI Database Project	www.reckeholz.ch/doc/en/forsch/control/bilanz/bilanz.html	Suíça
	www.nrel.gov/lci	EUA

Fonte: (CURRAN; NOTTEN, 2006)

Os softwares desenvolvidos para a realização de estudos de ACV visam facilitar o processo de análise de dados visto que o grande volume de informações e cálculos tornam essa tarefa complexa. Os softwares permitem a escolha de bancos de dados e métodos de avaliação de impacto disponíveis no mercado e realizam os cálculos de impacto ambiental, fornecendo ao usuário os resultados em forma de fluxogramas, tabelas e gráficos. Na Tabela 4 são ilustrados os principais softwares de ACV existentes.

Tabela 4 – Principais softwares de ACV

<i>Nome</i>	<i>Endereço na internet</i>
BEES	http://www.nist.gov/el/economics/BEESSoftware.cfm/
The Boustead Model	http://www.boustead-consulting.co.uk/products.htm
CMLCA	http://www.cmlca.eu/
ECO-it	http://www.pre-sustainability.com/content/eco-it-ecodesign-software
EIOLCA	http://www.eiolca.net/
GaBi	http://www.gabi-software.com/
GEMIS	http://www.oeko.de/service/gemis/en/index.htm
GREET Model	http://greet.es.anl.gov/
IDEMAT	http://www.idemat.nl/
LCAiT	http://www.lcait.com/
LCAPIX	http://www.kmlmtd.com/index.html
OpenLCA	http://www.openlca.org/index.html
SimaPro	http://www.pre-sustainability.com/content/simapro-lca-software
SolidWorks	http://www.solidworks.com/sustainability/sustainability-software.htm
Software Sustainable Minds	http://www.sustainableminds.com/
TEAM™	https://www.ecobilan.com/uk_team.php
Umberto	http://www.umberto.de/en/
WISARD™	https://www.ecobilan.com/uk_wisard.php

Fonte: (Silva, 2012)

3.6. TRABALHOS DE ACV SOBRE EPS

A fim de verificar o uso da ACV em estudos de desempenho ambiental do poliestireno expandido (EPS), foram efetuadas diversas pesquisas em bases de dados acadêmicas, entre elas SpringerLink Database, Science Direct e o Portal de Periódico da Coordenadoria para

Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES). A busca por artigos nesse tema resultou em 7 artigos com resultados de desempenho ambiental do EPS.

O primeiro artigo sobre avaliação de desempenho ambiental do EPS foi publicado em 2003 na *Journal of Cleaner Production*. Trata-se de um estudo australiano sobre embalagens de refrigeradores feitas com EPS e polietileno (PE) e a avaliação da possibilidade de substituição desse tipo de embalagem por embalagem feita de EPS, HIPS reciclado e PE. De acordo com o Ross e Evans (2003), dados de energia e materiais requeridos para a obtenção do EPS foram retirados de estudos previamente realizados por Boustead (1993a, 1993b) e pelos próprios autores, e Evans e Ross (1996). Os recursos e impactos avaliados ao longo do ciclo de vida das embalagens foram o consumo de combustíveis fósseis, emissões de gases do efeito estufa e precursores fotoquímicos oxidantes. Os resultados obtidos comprovaram que as estratégias de reciclagem e reutilização podem reduzir significativamente o impacto ambiental das embalagens à base de plástico. O estudo também inclui algumas descobertas interessantes sobre as contribuições relativas de transporte e de energia de construção, e os potenciais benefícios do ajuste dos resultados de avaliação de impacto levando em conta a variação espacial na significação de alguns efeitos ambientais.

O segundo artigo, publicado em 2005 na *Journal of Environmental Management*, trata do investigação e comparação de impactos ambientais na produção e disposição de dois tipos de materiais: EPS (poliestireno expandido) e CPB (papelão ondulado), utilizando o método ACV (TAN; KHOO, 2005). A primeira análise realizada considerou a fronteira “do berço ao portão” seguida da análise de disposição final dos materiais. A análise “do berço ao portão” utilizou como ferramenta o software *SimaPro 5.0* e como método de avaliação de impacto o *Eco-Indicator 99* e cinco categorias de impacto foram avaliadas: mudanças climáticas, acidificação/eutrofização, ecotoxicidade, combustíveis fósseis (recursos) e inorgânicos inaláveis e o resultado final da análise mostrou que o material CPB gerou impacto ambiental 60% a 70% mais elevado que o EPS. Com relação à análise de “fim de vida dos materiais” (*end-of-life*) o mesmo método de avaliação de impacto foi utilizado (Eco-Indicator 99) e as mesmas categorias de impacto foram analisadas, para 5 diferentes cenários: 100% disposição em aterro; 100% incineração; 50% aterramento e 50% incineração; 27% aterramento e 73% incineração e; 90% incineração e 10% aterramento. Os resultados mostram que o dano ambiental mínimo acontece quando 90% ou 100% dos materiais é incinerado. O maior dano ambiental ocorre quando 100% dos materiais é destinado a aterros, lembrando que neste caso os efeitos da reciclagem dos materiais não foram estudados.

Um estudo realizado no Reino Unido em 2012, publicado na revista *Journal of Polymers and the Environment*, investigou possíveis vantagens ambientais de biopolímeros sobre polímeros de origem petroquímica (GUO; MURPHY, 2012). A metodologia ACV foi utilizada para comparar biopolímeros advindos de trigo, batata e milho, denominados PVOH, com polietileno de baixa densidade (PEBD), polietileno de alta densidade (PEAD) e poliestireno expandido (EPS) em uma variedade de aplicações. Os resultados sugerem que não existe uma vantagem ambiental dos biopolímeros sobre seus homólogos petroquímicos em todos os casos. No geral, os biopolímeros se mostraram ambientalmente superiores quando comparados a embalagens térmicas de PEBD, porém esse não foi o caso, em outras aplicações, utilizando PEAD e EPS, que variou de acordo com diferentes cenários, como por exemplo, com a inserção da reciclagem. Sendo assim, os autores acreditam que uma hierarquia de parâmetros críticos para tomada de decisões baseada em ACV deve ser realizada neste caso.

Outro estudo recente (KANG et al., 2013) utilizando a metodologia ACV para analisar os impactos ambientais de embalagens de EPS foi publicado na revista *Journal of Cleaner Production* por pesquisadores dos Estados Unidos.

Recentemente, artigos sobre o ciclo de vida de materiais utilizados na construção civil têm sido publicados e estes incluem dados sobre o ciclo de vida do EPS.

4. ANÁLISE DO CONSUMO DE ENERGIA

Patrick Geddes (1884), biólogo e economista escocês, descreveu a baixa eficiência no uso de carvão em processos industriais ilustrando perdas de energia ao longo do ciclo de vida do carvão, sendo esse um dos primeiros estudos de consumo de energia ao longo do ciclo de vida de um produto. Somente no início dos anos setenta, com os altos preços da energia, os cientistas começaram a efetuar análises de consumo de energia de produtos e processos quando Boustead e Hancock (1979) publicaram o “*Handbook of Industrial Energy Analysis*” contendo tabelas de requerimento energético de mais de 400 processos industriais.

Com a introdução do conceito de Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) por Hunt et al. (1974), o consumo de energia primária total denominado Requerimento de Energia Total - *Gross Energy Requirement* (IFIAS, 1978) ou Consumo Acumulado de Energia – *Cumulative Energy Demand* (KLÖPFFER, 1997), tem sido um dos indicadores chave abordados nos estudos (FRISCHKNECHT et al., 2015). Atualmente existem orientações alemã (VDI 2012), suíça (SIA 2010), normas européias (EN 15804 2013, EN 15643-2 2011, EN 15978 2012) e também o relatório técnico (ISO/TR 14047) de como estimar o consumo acumulado de energia (CED) em estudos de ACV, e este é definido de diferentes formas. O consumo acumulado de energia consiste no levantamento de requerimento de energia primária direta e indireta usada durante todo o ciclo de vida dos insumos e materiais auxiliares, considerando as três fases do ciclo (produção, uso e disposição) (RÖHRLICH, 2000):

$$CED_p + CED_U + CED_D \quad (2)$$

O consumo de energia é basicamente descrito em duas principais categorias de energia secundária: (i) energia elétrica e (ii) energia térmica. Utiliza-se também a categoria “não energética” ou “reserva de energia” para contabilizar o valor calorífico de um material quando ele pode ser considerado como um vetor energético, como por exemplo na fabricação de plásticos, cuja energia fica na cadeia polimérica ao invés de ser utilizada como combustível (PLASTICS EUROPE, 2015).

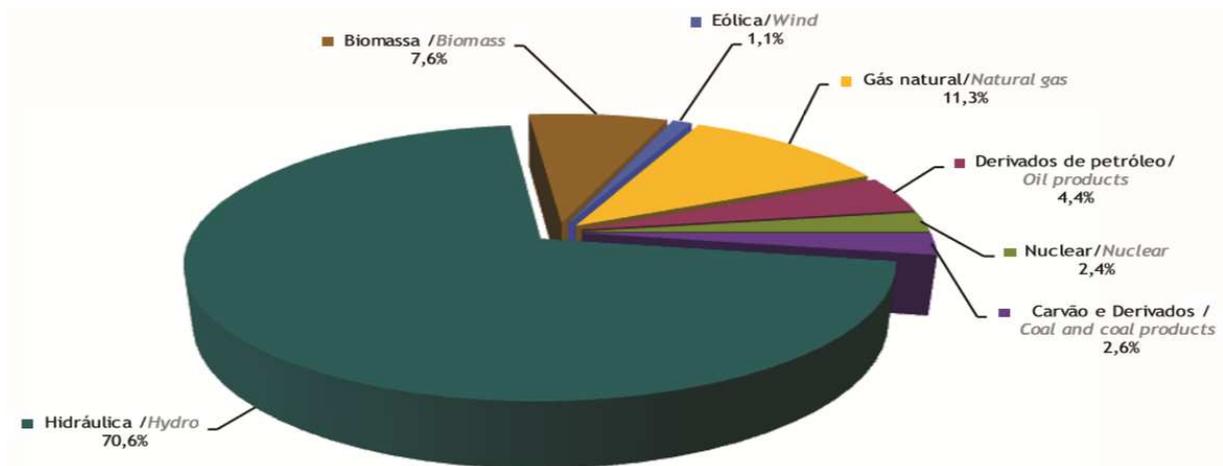
A energia primária pode ser obtida através da conversão direta do consumo de energia utilizando o equivalente em energia primária (EEP) (ALSEMA, 1998) através da aplicação das eficiências de conversão de energia (elétrica ou térmica), de acordo com as Equações (3) e (4).

$$E_{EEP} = \frac{E_{el}}{\eta_{el}} [\text{MJ}] \quad (3)$$

$$E_{EEP} = \frac{E_{ter}}{\eta_{ter}} [\text{MJ}] \quad (4)$$

Para a determinação do consumo de energia elétrica em termos de energia primária utiliza-se o método de conteúdo de energia física, adotado pela Agência Internacional de Energia (IEA). Nesse método, o equivalente de energia primária para geração de energia elétrica a partir de energia hídrica e solar fotovoltaica tem uma eficiência de conversão de 100 %, a energia nuclear tem uma eficiência de conversão térmica de 33 %, a energia geotérmica tem eficiência de conversão de 10% para geração de energia elétrica e 50 % para geração de calor e a energia solar térmica para geração de energia elétrica tem uma eficiência de 33 % e 100% para geração de calor. Para fontes de energia combustíveis, a eficiência adotada é de 100%. Para calcular a energia primária advinda da energia elétrica no Brasil leva-se em conta a matriz energética brasileira do ano de 2013 (Figura 21). Deve-se considerar também as perdas na transmissão da energia elétrica, que no Brasil, de acordo com a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) é uma média de 13,5% (ANEEL, 2015).

Figura 21 - Matriz energética brasileira no ano de 2013



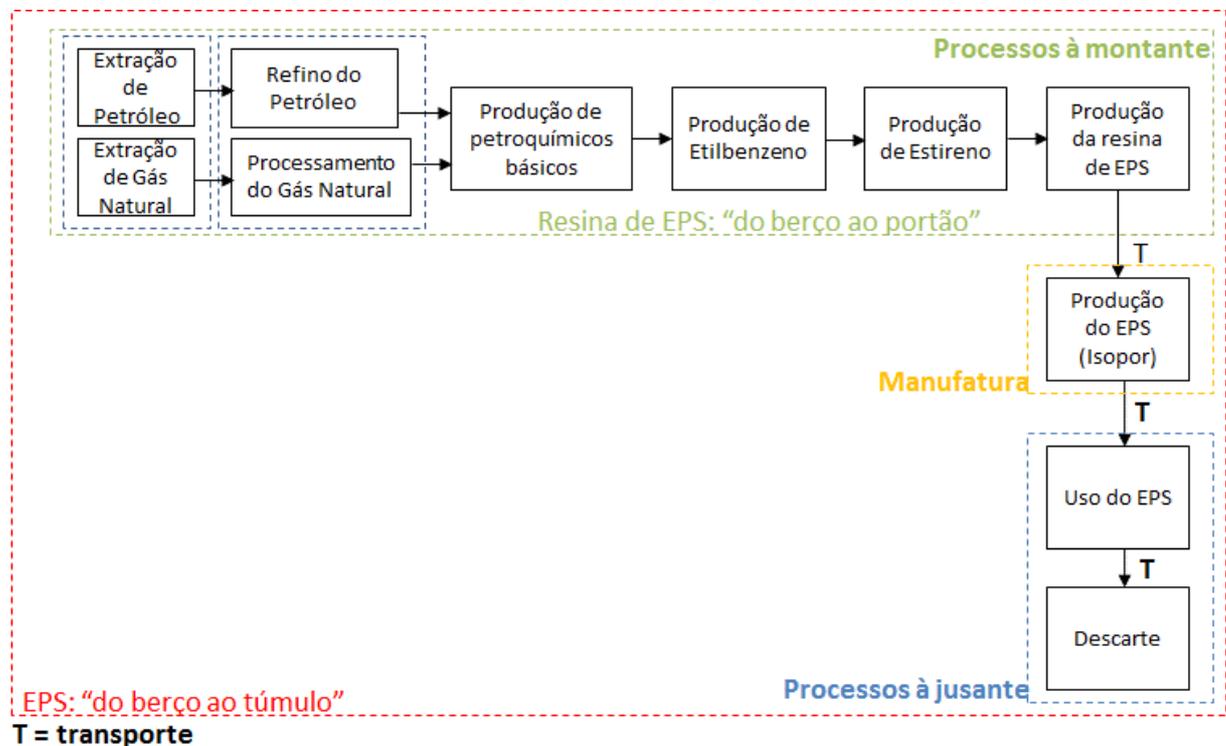
Fonte: (BEN, 2014)

O consumo acumulado de energia (CED) será o método de avaliação de impacto do EPS de densidade em blocos ou placas (produto em estudo) com função de embalagem, e tem como unidade funcional a produção ou reciclagem de 1 kg de EPS, com fluxo de referência também de 1 kg de EPS, ou seja, os impactos levantados durante o estudo são dados em função desse

fluxo. Os processos que constituem o ciclo de vida do EPS estão ilustrados na Figura 2, o que define o sistema de produto em estudo.

As fronteiras do sistema em estudo estão identificadas na Figura 22. Primeiramente será realizada análise de consumo de energia da manufatura do EPS (“do portão ao portão”) e posteriormente todo o ciclo de vida (processos à montante, manufatura e processos à jusante). Os dados utilizados no estudo abrangem o período de 2001 a 2014 e as seguintes localizações: Europa, Estados Unidos e Brasil. Critérios de exclusão de dados e procedimentos de alocação, bem como requisitos de qualidade dos dados e limitações do estudo serão apresentadas no decorrer desse capítulo.

Figura 22 – Fronteiras do sistema em estudo: Processo de produção de EPS sem reciclagem.



Fonte: (Elaboração própria)

4.1. ANÁLISE DE CONSUMO DE ENERGIA “DO PORTÃO AO PORTÃO”

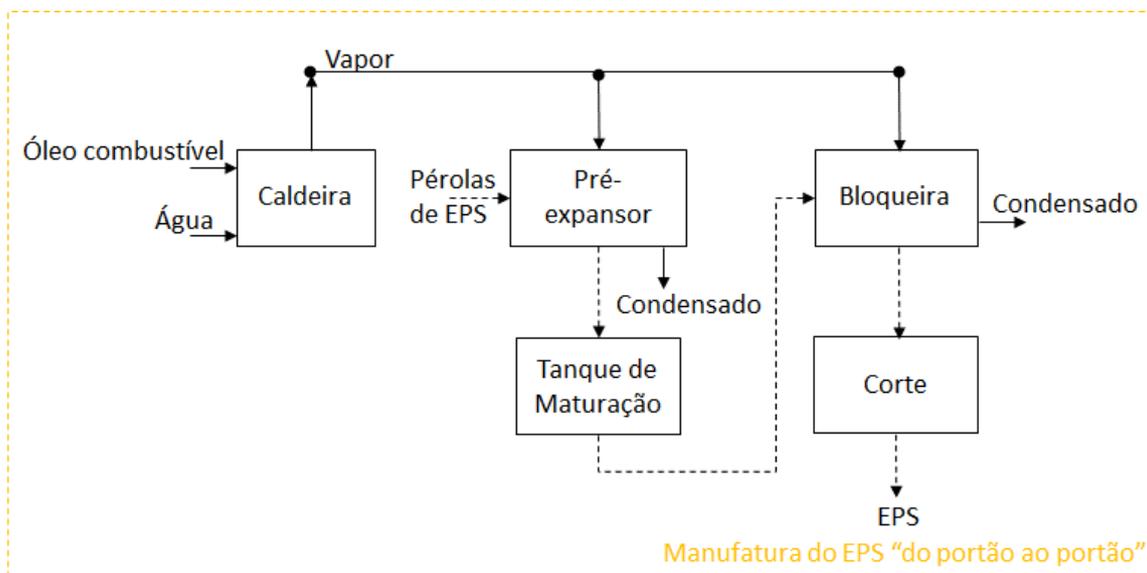
Neste tópico são avaliados os processos de produção e reciclagem de EPS na manufatura (“do portão ao portão”), para determinação do consumo de energia. Primeiramente é avaliado

o processo de produção do EPS e posteriormente os processos de reciclagem por injeção de vapor e reciclagem termomecânica.

4.1.1. Análise de consumo de energia no processo de produção do EPS

Os limites do sistema em estudo estão ilustrados na Figura 23, bem como os fluxos de energia e material no processo. Logo deve-se realizar a análise do inventário do processo. Na Tabela 5 são apresentados os dados coletados (dados de artigos científicos e relatórios técnicos) convertidos para adequação ao fluxo de referência. Procedimentos de alocação de dados não foram realizados. Dentre os dados coletados, somente os dados de consumo de energia foram priorizados, visto que nesta etapa será avaliado somente o impacto do consumo de energia no processo de produção de EPS. Uma das limitações encontradas nessa fase do estudo foi a disponibilidade restrita de dados de indústrias brasileiras fabricantes de EPS.

Figura 23 - Fronteira do processo de produção de EPS



Fonte: Adaptado de GROTE e SILVEIRA (2003)

Tabela 5 – Entradas e saídas na produção “do portão ao portão” de 1 kg de EPS.

Dados	EUMEPS (2001)*	GROTE e SILVEIRA (2003)
Entradas		
Água (l)	13,891	9,36
Gás natural (kWh)	6,502	NA
Óleo combustível (kWh)	1,865	10,69
Energia elétrica (kWh)	1,172	0,875
Pérolas de EPS (kg)	1,068	-
Saídas		
Água (l)	5,113	-
EPS (kg)	1,004	1,000
Pentano emitido (%)	5,7	-
Vapor (kg)	8,633	-

*média de valores de 15 empresas europeias produtoras de EPS.

Fonte: Elaboração própria

Dados de consumo de energia total de processos de produção de EPS foram encontrados na literatura e estão listados na Tabela 6. Dados de consumo acumulado de energia (CED) não estão disponíveis para processos “do portão ao portão” em bancos de dados. Esses dados geralmente são disponibilizados considerando os processos “do berço ao portão” ou “do berço ao túmulo” onde o consumo de energia de processos à montante é somado.

Tabela 6 - Consumo de energia para a produção de EPS

<i>Fonte de Dados</i>	<i>Localização das empresas</i>	<i>Consumo específico de energia, MJ/kg_{EPS}</i>
GROTE E SILVEIRA, 2003	Brasil	41,63
EUMEPS, 2001	Europa	34,34
BASF, 1997	Alemanha	35,73
EUMEPS, 2011	Europa	40,50

Fonte: Elaboração própria

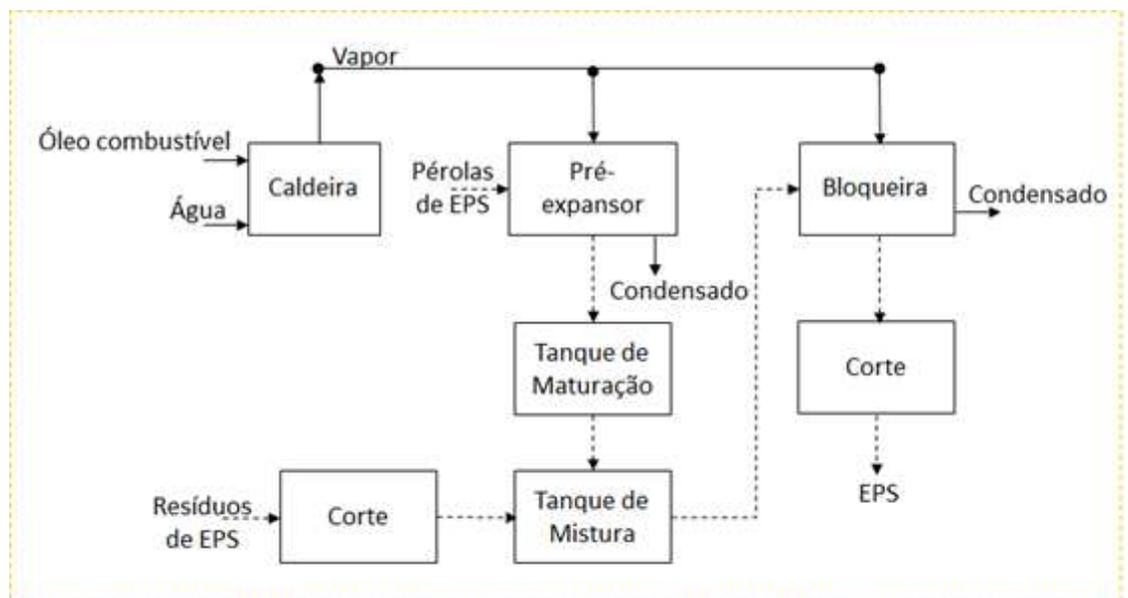
Pode-se observar que o consumo de energia total do processo em estudo (GROTE; SILVEIRA, 2003), tem valores próximos aos encontrados na literatura, visto que ocorrem variações quanto as fontes de energia utilizadas para cada processo em estudo.

4.1.2. Análise de consumo de energia na reciclagem por injeção de vapor

A reciclagem de EPS por injeção de vapor foi realizada em 2 diferentes cenários, cada um com uma quantidade diferente de resíduos de EPS inseridos no processo. Segue a descrição dos cenários:

- **CENÁRIO 1, 30% DE RESÍDUOS DE EPS:** Neste cenário, o processo convencional de produção de EPS é minimamente alterado para permitir a inserção de resíduos de EPS que serão misturados ao EPS virgem pré-expandido para obtenção de blocos. A composição da matéria-prima de entrada é de 30% de resíduos de EPS e 70% de material virgem. Os limites do sistema, bem como os fluxos de energia e materiais podem ser observados na Figura 24. O EPS obtido por este processo é chamado EPS30 e ele é fabricado com o uso de resíduos limpos advindos da produção.
- **CENÁRIO 2, 40% DE RESÍDUOS DE EPS:** Neste novo cenário uma nova quantidade de resíduos de EPS é inserida no processo. A composição da matéria-prima de entrada é de 40% de resíduos de EPS e 60% de material virgem. O EPS obtido para este processo é chamado de EPS40 e ele é fabricado com a utilização de resíduos limpos gerados em outras indústrias.

Figura 24 - Fronteira do processo de reciclagem por injeção de vapor



Fonte: Adaptado de GROTE e SILVEIRA (2003)

Nessa etapa do estudo procedimentos de alocação de dados não foram realizados. Dentre os dados coletados, somente os dados de consumo de energia foram priorizados. A principal limitação encontrada nessa etapa foi a disponibilidade de dados de somente uma referência nacional. Os dados de consumo de energia para o processo de reciclagem de EPS por injeção de vapor (cenários 1 e 2) são apresentados na Tabela 7.

Tabela 7 - Consumo de energia do processo de reciclagem por injeção de vapor

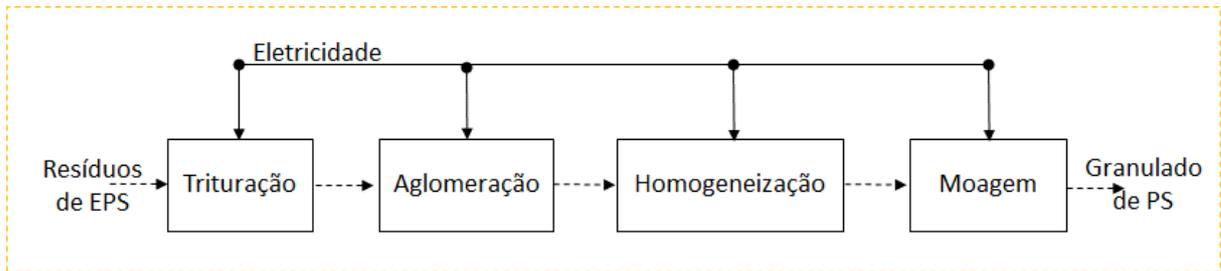
<i>Tipo de EPS</i>	<i>Fonte de energia</i>	<i>Consumo específico de energia, MJ/kg_{EPS}</i>
EPS30 (Cenário 1)	Óleo combustível	31,58
	Energia elétrica	2,06
	CE _T	33,64
EPS40 (Cenário 2)	Óleo combustível	29,28
	Energia elétrica	2,04
	CE _T	31,32

Fonte: Adaptado de GROTE e SILVEIRA (2003)

4.1.3. Análise de consumo de energia na reciclagem termomecânica

O processo de reciclagem termomecânica consiste na reciclagem de EPS para obtenção de PS reciclado, conforme descrito no capítulo 2. As fronteiras do sistemas podem ser observadas na Figura 25. Procedimentos de alocação de dados não foram realizados nessa etapa. Devido a falta de disponibilidade de dados de consumo de energia das etapas desse processo de reciclagem, os dados utilizados foram calculados através da potência nominal de cada equipamento (Tabela 8), visto que todos os equipamentos são elétricos. Uma das limitações dessa fase é que o processo de reciclagem termomecânica somente foi realizado em pequena escala (laboratório).

Figura 25 - Fronteira do processo de reciclagem termomecânica



Fonte: Adaptado de SCHMIDT (2012)

Tabela 8 - Potencia e tempo de processamento por equipamento.

<i>Equipamentos</i>	<i>Potência Nominal (kW)</i>	<i>Tempo de processamento (h)</i>	<i>Quantidade de EPS processada (kg)</i>
Triturador (GP-1500 AB)	1,1	0,15	1
Estufa (Orion 515)	0,5	3,0	0,1
Homogeneizador (MH-50H)	5,9	0,05	0,2
Moinho	1,5	0,20	1

Fonte: Elaboração própria

Na Tabela 9 são apresentados os dados de consumo de energia em cada equipamento, em MJ por quilogramas de EPS reciclado.

Tabela 9 - Consumo de energia para cada etapa do processo de reciclagem termomecânica

<i>Equipamentos</i>	<i>Consumo específico de energia, MJ/kgEPS</i>
Triturador (GP-1500 AB)	0,59
Estufa (Orion 515)	54
Homogeneizador (MH-50H)	5,3
Moinho	1,08
CE _T	60,98

Fonte: Elaboração própria

4.2. ANÁLISE DE CONSUMO DE ENERGIA “DO BERÇO AO TÚMULO”

Para avaliar os impactos ambientais do ciclo de vida do EPS “do berço ao túmulo”, com a inserção de processos de reciclagem em seu ciclo de vida, foram utilizados dados obtidos na literatura (artigos científicos e relatórios técnicos) para a o ciclo de vida do EPS, desde a extração das matérias-primas (petróleo e gás natural), passando pela etapa de fabricação da resina, do EPS, seu uso e descarte.

4.2.1 Análise de consumo de energia no ciclo de vida do EPS: Processo de produção convencional

O ciclo de vida do EPS foi dividido em 5 etapas: (i) processo de produção da resina de EPS (“do berço ao portão”), que compreende da extração do petróleo até a fabricação da resina de EPS, (ii) Processo de produção de EPS (“do portão ao portão”), (iii) Uso do EPS, (iv) Descarte do EPS (considerando somente descarte em aterro) e (v) Transporte do EPS ao longo do ciclo de vida.

Para o consumo de energia da etapa 1 (“do berço ao portão”) adotou-se a média de consumo acumulado de energia (Tabela 10), calculada a partir das diferentes fontes de dados encontradas para produção da resina de EPS, considerando que para a produção de 1kg de EPS são necessários 1,07 kg de resina de EPS (EUMEPS, 2001). Para o consumo de energia da etapa 2 (processo de produção do EPS “do portão ao portão”), foram considerados os dados de consumo de energia primária do processo descrito por Grote e Silveira (2003) (Tabela 6).

Na etapa 3 (Uso do EPS), o consumo de energia foi calculado considerando a utilização do EPS como embalagem com alocação por massa, considerando que a massa de EPS representa 5 % da massa total da carga. O tipo de caminhão e a distância percorrida são apresentados na Tabela 11. Na etapa de descarte do EPS (etapa 4) o consumo de energia foi considerado “zero”, visto que o EPS representa cerca de 1% do lixo, é um resíduo inerte e que os aterros sanitários mais próximos a empresa geradora dos resíduos não utilizam o metano para geração de energia.

Na etapa 5 (Transporte) o consumo de energia foi determinado a partir do PCI do combustível utilizado, da distância percorrida e do tipo de caminhão. O procedimento de alocação adotado foi por volume ocupado. As rotas de transporte (ilustradas na Figura 22) são as seguintes: (a) transporte da resina de EPS até o processo de produção do EPS, (b) transporte

do EPS produzido até o consumidor (c) transporte do resíduo de EPS do consumidor para destinação final (Tabela 11). As distâncias foram definidas com base em dados disponibilizados pela empresa produtora de EPS. O combustível utilizado, neste caso diesel, tem PCI igual a 42944 kJ/kg e densidade igual a 0,85 kg/L e os dados de consumo de combustível de acordo com a carga do caminhão são ilustrados na Tabela 12.

Tabela 10 - Consumo de energia da extração do petróleo à fabricação da resina de EPS

<i>Fonte de Dados</i>	<i>Consumo de energia acumulada, MJ/kg_{resina de EPS}</i>
EUMEPS (2001)	81,99
EUMEPS (2002b)	93,10
Andrady (2003)	83,66
Patel (2003)	70,80
Plastics Europe (2006)	88,61
Madival et al. (2009)	96,10
Pargana (2012)	79,76
Suwanmanee et al. (2013)	86,13
Ecoinvent Centre (2014)	89,58
<i>Média</i>	85,53

Fonte: Elaboração própria

Tabela 11 – Informações sobre transporte

<i>Etapa</i>	<i>Tipo de caminhão</i>	<i>Carga máxima (ton)</i>	<i>Carga real (ton)</i>	<i>Distância percorrida (km)</i>	<i>Retorno vazio?</i>
3	Carreta	25	24	350	Sim
5a	Carreta	25	24	100	Sim
5b	Carreta	25	0,7	100	Sim
5c	Carreta	25	0,6	100	Sim

Fonte: Elaboração própria

Tabela 12 - Consumo de combustível no transporte

<i>Carga</i>	<i>Consumo (km/l)</i>
Vazio	2,8
10 ton	2,5
20 ton	2,2
22 ton	2,1
25 ton	1,9

Fonte: Adaptado de FABI (2004)

O consumo específico de energia primária devido ao transporte (CE_{tr}) pode ser estimada com base no consumo de combustível (CC). A equação 5 é utilizada para calcular o consumo de combustível em MJ:

$$CE_{tr(MJ)} = CC_{(kg)} \cdot PCI_{(MJ/kg)} \quad (5)$$

O consumo específico de energia primária advinda do combustível foi calculada para o uso e transporte do EPS e pode ser observada na Tabela 13.

Tabela 13 - Consumo de energia nas etapas de transporte

<i>Rota</i>	<i>Distância percorrida, (km)</i>	<i>Consumo de combustível, (kg)</i>	<i>Energia do combustível (MJ)</i>	<i>Consumo específico de energia, MJ/kg_{EPS}</i>
3	350	156,58	11286,93	0,4703
5a	100	44,74	3224,84	0,1435
5b	100	30,36	2607,31	3,7247
5c	100	30,36	2607,31	4,3455
TOTAL (Etapa 5)				8,2137

Fonte: Elaboração própria

O consumo de energia primária para cada etapa do ciclo de vida do EPS (em MJ/kg_{EPS}) é mostrada na Tabela 14.

Tabela 14 - Consumo de energia no ciclo de vida do EPS

<i>Etapa</i>	<i>Descrição</i>	<i>Consumo específico de energia, MJ/kg EPS</i>	<i>%</i>
1	Produção da resina de EPS	79,93	61,37
2	Produção do EPS	41,63	31,97
3	Uso do EPS	0,47	0,36
4	Descarte do EPS	-	0
5	Transporte	8,21	6,30
	TOTAL	130,24	100

Fonte: Elaboração própria

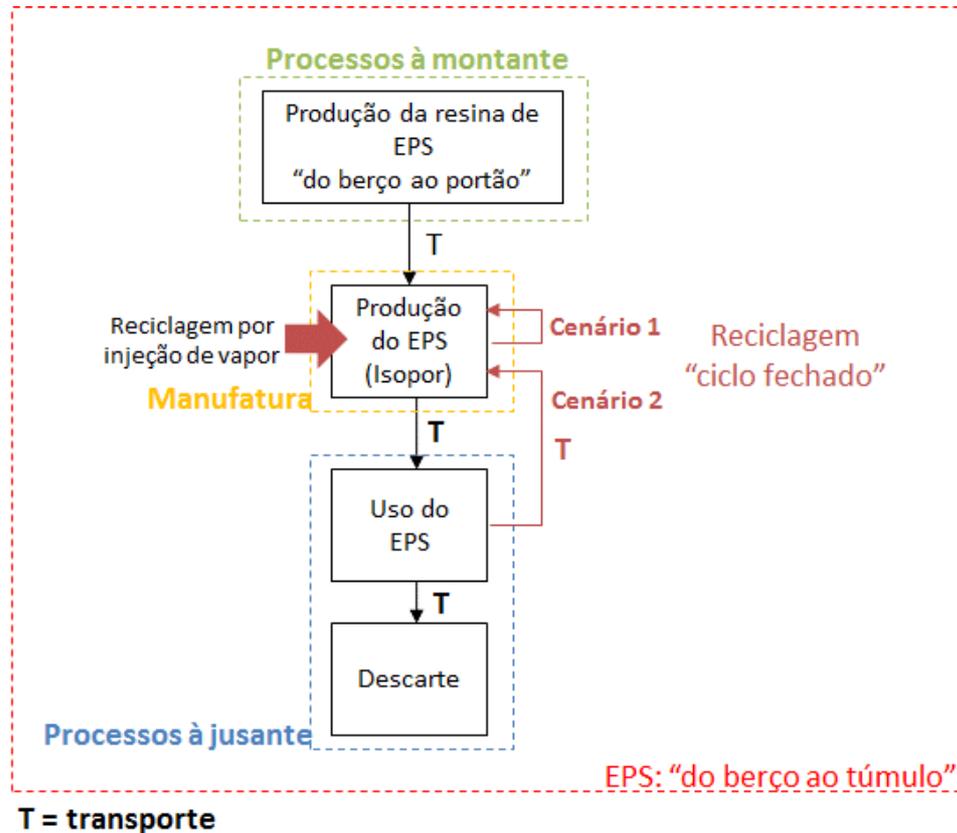
4.2.2. Análise de consumo de energia no ciclo de vida do EPS com a inserção da reciclagem por injeção de vapor

O processo de *reciclagem por injeção de vapor*, quando inserido no ciclo de vida do EPS, permite a reutilização de parte dos resíduos que seriam destinados a aterros (Figura 26). Os dois cenários de reciclagem propostos foram avaliados levando em consideração todo o ciclo de vida do EPS, o que significa uma substituição de 30 a 40% da matéria-prima virgem por resíduos de EPS.

O cenário 1 considera a reutilização de 30% de resíduos (gerados no próprio processo) e 70% de matéria-prima virgem, portanto impactos gerados pelo transporte dos resíduos que ocorre dentro da empresa não são considerados, visto que a distância é muito pequena.

O cenário 2 considera a reutilização de 40% de resíduos gerados por uma empresa localizada em Taubaté – SP. A distância percorrida pelo resíduo até chegar ao processo de produção onde o EPS é reciclado é de 150 km, sendo esta denominada de Etapa 5(d) (Tabela 15).

Figura 26 - Ciclo de vida do EPS considerando a reciclagem por injeção de vapor



Fonte: Elaboração própria

Tabela 15 - Consumo de energia nas etapas de transporte considerando a reciclagem

<i>Rota</i>	<i>Distância Percorrida, (km)</i>	<i>Consumo de combustível, (kg)</i>	<i>Energia do combustível (MJ)</i>	<i>Consumo específico de energia, MJ/kg_{EPS}</i>
5d	150	45,54	3910,97	6,5183

Fonte: Elaboração própria.

Primeiramente o ciclo de vida do EPS considerando o cenário 1 foi analisado. Para tanto, considera-se que a matéria-prima para a produção de EPS é 70% resina de EPS e 30% resíduo de EPS do próprio processo, logo uma menor quantidade de resina por quilo de EPS produzido será utilizada (alocação por massa). Logo, o consumo de energia no processo de produção do EPS com a inserção de 30% de resíduos também é menor. Com relação ao uso e descarte do EPS, o consumo de energia permanece o mesmo. Na Tabela 16 são apresentados os dados de consumo de energia para o ciclo de vida do EPS considerando este cenário.

Tabela 16 - Consumo energia no ciclo de vida do EPS com a inserção da reciclagem por injeção de vapor, cenário 1

<i>Tipo de EPS</i>	<i>Etapa</i>	<i>Descrição</i>	<i>Consumo específico de energia, MJ/kg_{EPS}</i>	<i>%</i>
EPS30	1	Produção da resina de EPS	55,95	56,94
	2	Produção do EPS	33,64	34,23
	3	Uso do EPS	0,47	0,48
	4	Descarte do EPS	-	0
	5	Transporte	8,21	8,35
		TOTAL	98,27	100

Fonte: Elaboração própria

Em seguida o cenário 2 foi avaliado, considerando que os resíduos gerados após o uso do EPS percorrem uma distância de 150 km, voltando ao processo de produção de EPS para sua reciclagem (Tabela 17). A matéria-prima para o processo de produção de EPS é 40% resíduo de EPS e 60% de resina virgem de EPS. A reciclagem é realizada em ciclo fechado, ou seja, os resíduos voltam para o processo após o uso do EPS por algumas vezes, sem que o EPS fabricado a partir desses resíduos perca qualidade.

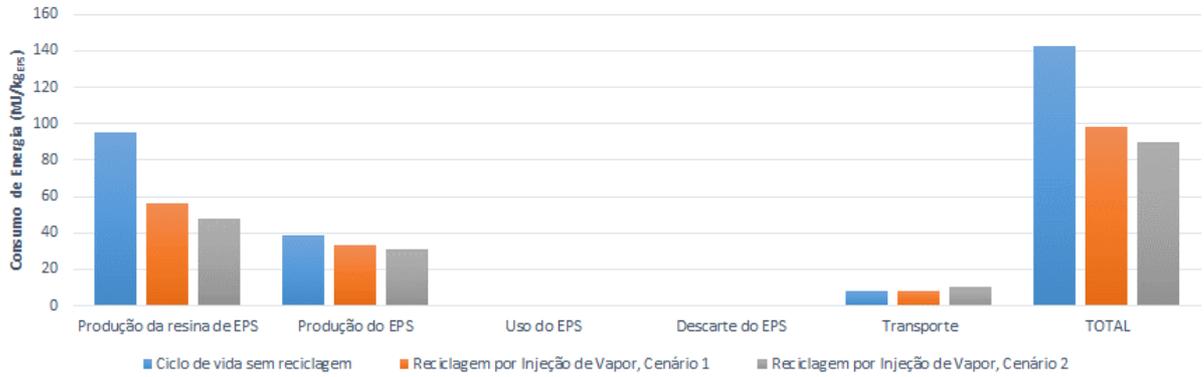
Tabela 17 - Consumo energia no ciclo de vida do EPS com a inserção da reciclagem por injeção de vapor, cenário 2

<i>Tipo de EPS</i>	<i>Etapa</i>	<i>Descrição</i>	<i>Consumo específico de energia, MJ/kg_{EPS}</i>	<i>%</i>
EPS40	1	Produção da resina de EPS	47,96	53,21
	2	Produção do EPS	31,32	34,75
	3	Uso do EPS	0,47	0,52
	4	Descarte do EPS	0	0
	5	Transporte	10,38	11,52
		TOTAL	90,13	100

Fonte: Elaboração própria

Na Figura 27 pode-se observar o consumo de energia primária para os dois cenários de *reciclagem por injeção de vapor*, comparados com o processo convencional de produção de EPS, sem a inserção de resíduos.

Figura 27 - Comparação do consumo de energia no ciclo de vida do EPS com e sem reciclagem

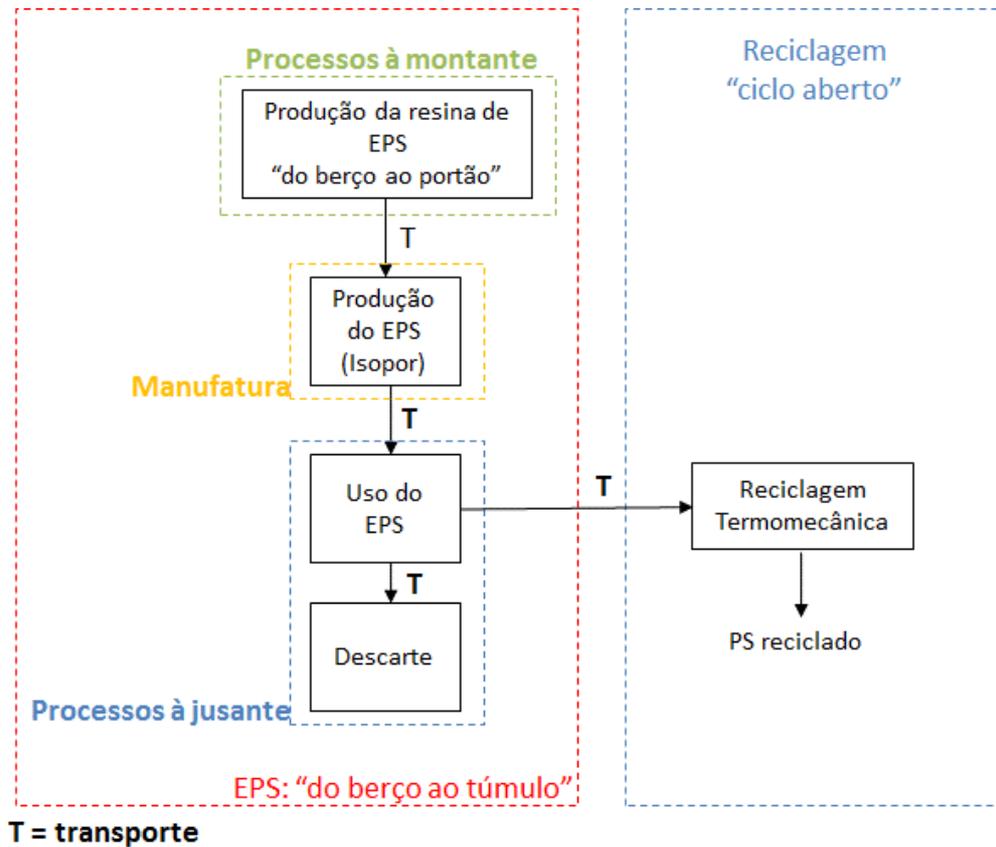


Fonte: Elaboração própria

4.2.3. Análise de consumo de energia no ciclo de vida do EPS com a inserção da reciclagem termomecânica

O processo de *reciclagem termomecânica*, se inserido no ciclo de vida do EPS, permite a reutilização dos resíduos que seriam destinados a aterros (Figura 28). Neste caso a reciclagem é realizada em ciclo aberto. O método de alocação utilizado é o cut-off e assume-se que o EPS é reciclado somente uma vez, gerando um produto (denominado produto secundário) com características diferentes do primeiro produto produzido. Neste tipo de reciclagem o EPS é transformado em poliestireno (PS), que pode ser usado para diversas aplicações.

Figura 28 - Ciclo de vida do EPS com a inserção da reciclagem termomecânica



Fonte: Elaboração própria

Para análise do ciclo de vida do EPS, considera-se que 100% dos resíduos que seriam destinados ao aterro serão enviados para o processo de *reciclagem termomecânica* e a distância percorrida pelo material é de 150 km, impacto que será adicionado ao ciclo de vida do EPS. O método de alocação utilizado prevê que os impactos gerados pela destinação final do EPS (que nesse caso será transformado em PS) passam a fazer parte da "segunda vida" do material, ou seja, os impactos são alocados na reciclagem termomecânica, que nesse estudo é comparada com o processo de produção do GPPS "do berço ao portão".

Tabela 18 - Consumo de energia no ciclo de vida do EPS reciclado em ciclo aberto

<i>Etapa</i>	<i>Descrição</i>	<i>Consumo específico de energia, MJ/kg_{EPS}</i>
1	Produção da resina de EPS	79,93
2	Produção do EPS	41,63
3	Uso do EPS	0,47
4	Descarte do EPS	0
5	Transporte	10,39
	TOTAL	132,42

Fonte: Elaboração própria

Nota-se (Tabela 18) que o consumo específico de energia é ligeiramente maior para a reciclagem devido ao transporte do EPS para a reciclagem, ao invés da destinação desse material para aterro.

Para a comparação do processo de *reciclagem termomecânica* com o processo de obtenção da resina de poliestireno cristal (GPPS) “do berço ao portão” vale destacar que o processo de reciclagem foi estudado em escala de laboratório e os dados de produção do GPPS foram obtidos com base em processos de produção da Europa. Na Tabela 19 é possível observar o consumo de energia primária de ambos os processos. Pode-se observar que o consumo de energia para a *reciclagem termomecânica* é menor, visto que neste caso as operações para extração e processamento da matéria-prima virgem são evitadas. Como a comparação é feita apenas “do berço ao portão”, os impactos da destinação final do PS depois de utilizado não estão incluídos no estudo.

Tabela 19 - Consumo de energia para a produção de GPPS (convencional x reciclagem)

<i>Processo</i>	<i>Consumo específico de Energia, MJ/kg_{PS}</i>
Produção de GPPS “do berço ao portão”	82,78*
Reciclagem Termomecânica de EPS “do portão ao portão”	60,98

*Dado da Plastics Europe (2012).

Fonte: Elaboração própria

5. ANÁLISE DE EMISSÕES DE GASES DO EFEITO ESTUFA (GEE)

5.1. ANÁLISE DE GEEs “DO PORTÃO AO PORTÃO”

Neste capítulo são estimados os níveis de emissões de GEE's dos processos de reciclagem do EPS (reciclagem por injeção de vapor e reciclagem termomecânica) “do portão ao portão”. O método de avaliação de impacto é o método do IPCC (GWP), sendo o sistema de produto, a unidade funcional, o fluxo de referência, e as fronteiras do sistema os mesmos considerados no capítulo 4.

5.1.1. Análise de GEEs no processo de produção do EPS

A análise de emissões realizada neste capítulo visa quantificar as emissões gases do efeito estufa nos processos de produção e reciclagem de EPS “do portão ao portão” e também em todo o ciclo de vida do EPS (“do berço ao túmulo”). As emissões de gases do efeito estufa (GEE) foram calculadas para os processos em estudo e para o ciclo de vida do EPS considerando o potencial de aquecimento global (GWP) para um horizonte de 100 anos, de acordo com o IPCC (2006, 2013).

5.1.1.1. Potencial de aquecimento global (GWP)

Os combustíveis fósseis são a forma dominante de energia utilizada no mundo (86%) e representam cerca de 75% das emissões antropogênicas de CO₂ (HOUGHTON et al., 2011). O *Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)* desenvolveu um modelo globalmente reconhecido, denominado modelo Bern, que é conhecido como *Global Warming Potentials (GWP)* ou Potencial de Aquecimento Global. O Modelo de Bern foi projetado para estudar a relação entre as emissões de carbono antropogênicas e níveis de CO₂ na atmosfera, bem como a resposta transitória do sinal de temperatura da superfície de uma perturbação no balanço

radiativo da Terra (HOUGHTON et al.,1996). O IPCC compilou uma lista de estimativas para GWPs com o horizonte de tempo de 20, 100 e 500 anos (Tabela 20).

Tabela 20 - Potencial de aquecimento global (GWP) dos principais gases do efeito estufa

<i>Poluentes</i>	<i>Tempo de vida (anos)</i>	<i>GWP (kg CO₂eq) 2013</i>			<i>GWP (kg CO₂eq) 2007</i>			<i>GWP (kg CO₂eq) 2001</i>		
		<i>20</i>	<i>100</i>	<i>500</i>	<i>20</i>	<i>100</i>	<i>500</i>	<i>20</i>	<i>100</i>	<i>500</i>
		<i>anos</i>	<i>anos</i>	<i>anos</i>	<i>anos</i>	<i>anos</i>	<i>anos</i>	<i>anos</i>	<i>anos</i>	<i>anos</i>
CO ₂	150	1	1	1	1	1	1	1	1	1
CH ₄	12	84	28	NA	72	25	7,6	62	23	7
N ₂ O	114	264	265	NA	289	298	153	275	296	156

Fonte: Adaptado de GHG Management Institute (2015).

Sendo assim, os gases de efeito estufa considerados neste trabalho são o CO₂, CH₄ e N₂O e as emissões totais são dadas em kg de CO₂ equivalente (CO₂eq), de acordo com a equação (6), considerando GWP para 100 anos de acordo com o IPCC (2013):

$$CO_2eq = CO_2 + 28(CH_4) + 265(N_2O) \quad (6)$$

O inventário de emissões de um processo é realizado considerando 3 escopos (PROGRAMA BRASILEIRO GHG PROTOCOL, 2014): (1) emissões diretas de gases do efeito estufa (GEE), que são aquelas emitidas por fontes próprias ou controladas pela empresa, como emissões do processo industrial ou por transporte; (2) emissões indiretas, por exemplo emissões por aquisição de energia elétrica ou térmica consumida pela empresa e; (3) outras emissões indiretas, uma categoria de relato opcional, que permite a consideração de todas as outras emissões indiretas. As emissões do Escopo 3 são uma consequência das atividades da empresa, mas ocorrem em fontes que não pertencem ou não são controladas pela empresa.

Para os processos em estudo foram estimadas as seguintes emissões, de acordo com o IPCC (2006):

- Emissões de Escopo 1: Fontes fixas de queima de combustíveis fósseis (IPCC, 2006a) e fontes móveis de queima de combustíveis fósseis (IPCC, 2006b), de acordo com a Tabela 21.

- Emissões de Escopo 2: Energia elétrica comprada do *SIN* sem a contabilização de perdas na transmissão e distribuição (PROGRAMA BRASILEIRO GHG PROTOCOL, 2014), considerando a matriz de energia elétrica brasileira e o fator de emissões de 34,72 gCO₂eq/MJ de energia elétrica, de acordo com Miranda (2012).

Tabela 21 - Fatores de emissão para fontes fixas, escopo 1

	<i>Fator de emissão (kg/GJ)</i>		
	<i>CO₂</i>	<i>CH₄</i>	<i>N₂O</i>
Fonte fixa queimando óleo combustível	77,4	0,003	0,0006
Fator de emissão (CO ₂ eq)	77,643		

Fonte: Elaboração própria a partir de IPCC (2006a)

Sendo assim foi possível calcular as emissões advindas da queima de óleo combustível (BPF 1A) na caldeira e da energia elétrica consumida no processo de produção do EPS. Para estimar as emissões, o fator de emissão dado em kg/GJ é multiplicado pelo consumo específico de energia dada em MJ/kg (método bottom-up), em seguida, as emissões são dadas em kgCO₂eq/kg_{EPS} produzidos (equação (7) e Tabela 22).

$$GWP_{1,2} = CE_p \cdot FE \quad (7)$$

Tabela 22 – Emissões de GEE's no processo de produção de EPS em estudo

<i>Fonte de energia</i>	<i>Consumo específico de energia, MJ/kg_{EPS}</i>	<i>Emissões de GEE (kg CO₂eq/kg_{EPS})</i>
Óleo combustível	38,48	2,99
Energia elétrica	3,15	0,109
CE _T	41,63	3,10

Fonte: Elaboração própria

5.1.2. Análise de GEEs na reciclagem por injeção de vapor

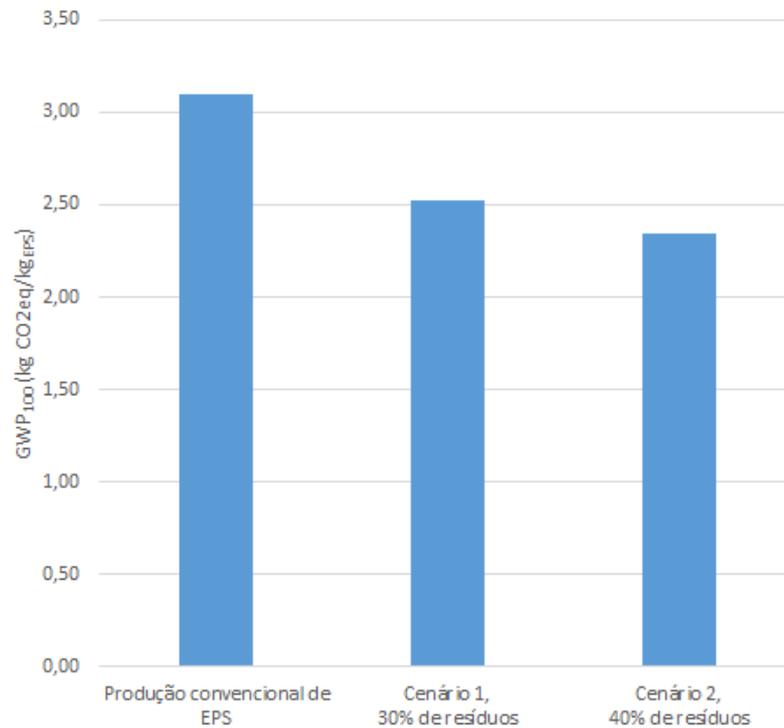
As emissões de GEE's para os dois cenários de reciclagem por injeção de vapor considerados são apresentados na Tabela 23. Em seguida são apresentadas as emissões de GEE's para o processo de produção e reciclagem de EPS por injeção de vapor, considerando os dois cenários (Figura 29).

Tabela 23 - Emissões de GEE's do processo de reciclagem por injeção de vapor

<i>Tipo de EPS</i>	<i>Fonte de energia</i>	<i>Consumo específico de energia, MJ/kg_{EPS}</i>	<i>Emissões de GEE (kg CO₂eq/kg_{EPS})</i>
EPS30	Óleo combustível	31,58	2,45
	Energia elétrica	2,06	0,072
	CE _T	33,64	2,52
EPS40	Óleo combustível	29,28	2,27
	Energia elétrica	2,04	0,0708
	CE _T	31,32	2,34

Fonte: Elaboração própria

Figura 29 - Comparação do processo de produção com e sem a inserção de resíduos de EPS



Fonte: Elaboração própria

5.1.3. Análise de GEEs na reciclagem termomecânica

As emissões de GEE's para o processo de reciclagem termomecânica de EPS são apresentados na Tabela 24.

Tabela 24 - Emissões de GEE's do processo de reciclagem termomecânica

<i>Equipamentos</i>	<i>Consumo específico de energia (MJ/kg_{PS})</i>	<i>Emissões de GEE (kg CO₂eq/kg_{PS})</i>
Triturador (GP-1500 AB)	0,59	0,0132
Estufa (Orion 515)	54	1,2053
Homogeneizador (MH-50H)	5,3	0,1183
Moinho	1,08	0,0241
Total	60,98	1,3609

Fonte: Elaboração própria

De acordo com os dados apresentados na Tabela 24, pode-se observar que, apesar do consumo de energia no processo reciclagem termomecânica de EPS ser elevado, os níveis de emissões de GEE são baixos. Isso se deve ao fato da matriz de energia elétrica brasileira ser predominantemente de origem renovável.

5.2. ANÁLISE DE GEEs “DO BERÇO AO TÚMULO”

5.2.1. Análise de GEEs no ciclo de vida do EPS: Processo de produção convencional

As emissões GEE's para o ciclo de vida do EPS (“do berço ao túmulo”) são então estimadas. Assim como no item 5.1.1, as emissões foram estimadas de acordo com a metodologia e dados do IPCC (2006). O potencial de aquecimento global (GWP) estimado, de acordo com a equação (7), foi dividido em 5 etapas: (i) Produção da resina de EPS “do berço ao portão”, (ii) Processo de produção de EPS “do portão ao portão”, (iii) Uso do EPS como embalagem, (iv) Descarte do EPS (considerando somente descarte em aterro) e (v) Transporte do EPS ao longo do ciclo de vida.

A metodologia para estimar emissões provenientes do transporte de produtos em estradas é baseada no uso de combustível, quilometragem do veículo, e tecnologia de controle dos veículos (EPA, 2008). O fator de emissão devido ao transporte, considerando a utilização de óleo diesel, é mostrado na Tabela 25.

Tabela 25 - Fatores de emissão para fontes móveis, escopo 1

	<i>Fator de emissão (kg/GJ)</i>		
	<i>CO₂</i>	<i>CH₄</i>	<i>N₂O</i>
Transporte em carreta à óleo diesel	74,1	0,0039	0,0039
Fator de emissão (CO ₂ eq)	75,2427		

Fonte: Elaboração própria a partir de IPCC (2006b)

Para a etapa 1, considera-se uma média dos valores de emissões para a produção da resina de EPS “do berço ao portão”, de acordo com a Tabela 26. Para as demais etapas, os níveis de emissões de CO₂ equivalente foram calculados de acordo com as equações (6) e (7) (Tabela 27).

Tabela 26 – Emissões de GEE para o processo de obtenção da resina de EPS “do berço ao portão” encontradas na literatura

<i>Fonte de Dados</i>	<i>Emissões de GEE (kg CO₂eq/kg resina de EPS)</i>
APME (1999)	2,60
Patel (2003)	1,87*
Plastics Europe (2006)	3,15
Madival et al. (2009)	2,80
Pargana (2012)	2,96
<i>Média</i>	<i>2,88</i>

*somente emissões de CO₂ foram consideradas.

Tabela 27 - Emissões de GEE's no ciclo de vida do EPS

<i>Etapa</i>	<i>Descrição</i>	<i>Consumo específico de energia (MJ/kg_{EPS})</i>	<i>Emissões de GEE (kg CO₂eq/kg_{EPS})</i>
1	Produção da resina de EPS	79,93	2,88
2	Produção do EPS	41,63	3,10
3	Uso do EPS	0,47	0,04
4	Descarte do EPS	0	0
5	Transporte	8,21	0,62
	TOTAL	130,24	6,64

Fonte: Elaboração própria

5.2.2. Análise de GEEs no ciclo de vida do EPS com a inserção da reciclagem por injeção de vapor

As emissões de GEE's para os dois cenários de *reciclagem de EPS por injeção de vapor* foram então estimadas e os resultados são apresentados na Tabela 28.

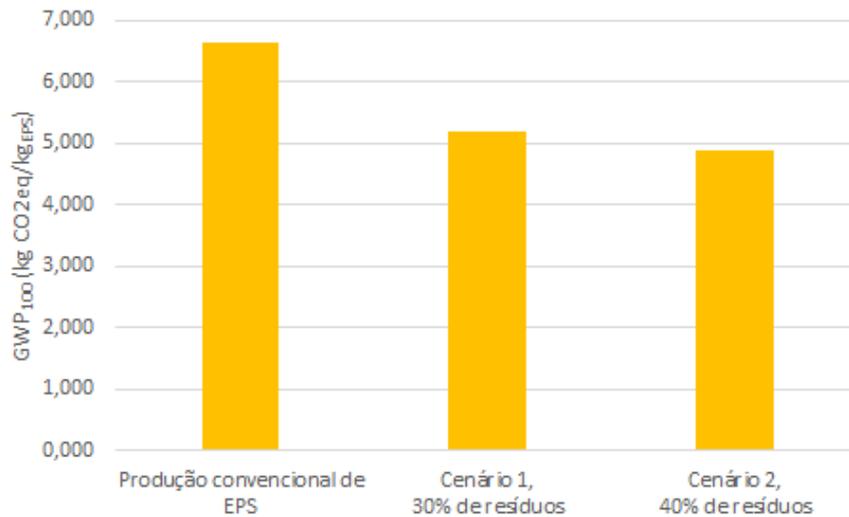
Tabela 28 - Consumo energia no ciclo de vida do EPS com a inserção da reciclagem por injeção de vapor

<i>Tipo de EPS</i>	<i>Etapa</i>	<i>Descrição</i>	<i>Consumo específico de energia (MJ/kg_{EPS})</i>	<i>Emissões de GEE (kgCO₂eq/kg_{EPS})</i>
EPS30	1	Produção da resina de EPS	55,95	2,016
	2	Produção do EPS	33,64	2,52
	3	Uso do EPS	0,47	0,04
	4	Descarte do EPS	0	0
	5	Transporte	8,21	0,62
		TOTAL	98,27	5,20
EPS40	1	Produção da resina de EPS	47,96	1,728
	2	Produção do EPS	31,32	2,34
	3	Uso do EPS	0,47	0,04
	4	Descarte do EPS	0	0
	5	Transporte	10,38	0,78
		TOTAL	90,13	4,89

Fonte: Elaboração própria

De acordo com os dados da Tabela 28, pode-se notar que ocorre uma diminuição de 1,5 a 1,75 kgCO₂eq/kg_{EPS} (20 a 26 %) com a inserção de resíduos em processos convencionais de produção de EPS (Figura 30).

Figura 30 - Comparativo das emissões de GEEs no ciclo de vida do EPS com e sem a reciclagem por injeção de vapor



Fonte: Elaboração própria

5.2.3. Análise de GEEs no ciclo de vida do EPS com a inserção da reciclagem termomecânica

Na Tabela 29 são apresentados os níveis de emissões do processo de *reciclagem termomecânica* (“do portão ao portão”), calculados para a realidade brasileira, e do processo de produção do GPPS (“do berço ao portão”) com base em dados europeus.

Tabela 29 - Emissões de GEE’s para a produção de GPPS (convencional x reciclagem)

<i>Processo</i>	<i>Emissões de GEE (kg CO₂eq/kg_{EPS})</i>
Produção de GPPS “do berço ao portão”	2,25*
Reciclagem Termomecânica de EPS “do portão ao portão”	2,12

*Dado da Plastics Europe (2012)

Fonte: Elaboração própria

Pode-se notar que os níveis de emissões para ambos os casos tem valores bem próximos. Vale destacar que a matriz de geração de energia elétrica da Europa foi considerada tendo 1% de fontes renováveis e a matriz energética brasileira cerca de 81%. Os níveis de emissões de CO₂ e CH₄ renováveis são levados em consideração para ambos os casos. Portanto, pode-se afirmar que o processo de *reciclagem termomecânica* emite menos GEE's do que o processo convencional de produção de PS.

6. CONCLUSÕES

Os benefícios ambientais do reuso de resíduos de EPS em substituição à matéria-prima virgem foram demonstrados para ambos os casos de reciclagem de EPS estudados, com significativa redução do consumo de energia e também das emissões de gases de efeito estufa geradas, tanto no processo de reciclagem como em todo o ciclo de vida do EPS. Com os resultados obtidos, verifica-se uma consequente redução no uso de insumos como petróleo, combustível, energia elétrica e água.

O processo de *reciclagem por injeção de vapor* se mostra uma alternativa simples e viável, já que esse pode ser realizado com uma pequena modificação no processo de produção convencional do EPS, o que permite a inserção de até 40% de resíduos e ainda a diminuição do consumo de energia elétrica, combustível, água e consequente redução de emissões de GEEs. Quando se analisa a inserção desse processo de reciclagem no ciclo de vida do EPS, ele se torna ainda mais atraente, visto que grande parte dos resíduos de EPS gerados retorna para a produção ao invés de serem destinados a aterros. Com isso a redução no uso insumos e energia elétrica ao longo do ciclo de vida é significativa mesmo com o acréscimo do uso de combustível para o transporte dos resíduos até a reciclagem.

O estudo do processo de *reciclagem termomecânica* evidencia que o consumo de energia para a produção de poliestireno reciclado é menor que o consumo de energia para a produção de poliestireno virgem (via processo convencional de produção de poliestireno cristal), assim como as emissões de GEEs. A inserção desse processo de reciclagem no ciclo de vida do EPS gera um benefício ambiental no que se refere a destinação dos resíduos do EPS para a reciclagem ao invés de aterros, visto que nesse caso os resíduos de EPS não retornam para seu ciclo de vida.

Um fator que pode limitar a aplicação desses processos é o transporte desses resíduos até a reciclagem, devido ao volume ocupado pelo EPS, o que gera um consumo de combustível significativo para a movimentação de grandes quantidades. Sendo assim, a implantação de processos de reciclagem deve ser realizada em locais estratégicos, para que os benefícios ambientais possam ser efetivamente obtidos.

Através da avaliação de ciclo de vida (ACV) do EPS pôde-se verificar o quão complexo é o levantamento e a interpretação de dados para esse tipo de estudo. O processo de levantamento de dados (inventário) é particularmente difícil no Brasil, que não possui bases de dados consistentes dos processos de extração e produção de petróleo, bem como da produção de químicos em geral. Aparentemente não há interesse por parte das indústrias e do governo para fornecimento de dados para elaboração de bancos de informações confiáveis. Sendo assim, fez-se necessário adoção de dados de outros países, o que pode gerar incertezas nos resultados obtidos nesse trabalho. A impossibilidade do uso de um software de ACV, empobrece o estudo, visto que esses softwares possibilitam a análise de impacto utilizando diversos métodos de análise que poderiam ter sido incluídos nesse estudo. O uso de softwares permite ainda garantir cálculos de maior confiança, bem como um processamento de dados mais prático.

Por fim, pode-se afirmar que a contribuição ambiental da reciclagem é significativa, visto que ela evita o descarte dos resíduos de EPS no meio ambiente, reduz o consumo de petróleo e energia elétrica, e conseqüentemente, reduz emissões de GEEs relacionadas ao sistema primário, que deixa de ocorrer quando o resíduo substitui parte da matéria-prima virgem. Considerando que a tendência é a diminuição de oferta do petróleo e de áreas para aterro de resíduos e também o aumento no consumo de EPS, a reciclagem vem de encontro a solucionar essas questões, minimizando os impactos ambientais e proporcionando benefícios para a sociedade.

Como sugestões para trabalhos futuros pode-se citar:

- Análise exergética dos processos de produção e reciclagem de EPS;
- Análise termoeconômica dos processos de produção e reciclagem de EPS;
- Incorporação de estudos de outros métodos de reciclagem de EPS;
- Incorporação de técnicas de cogeração de energia nos processos de produção e de reciclagem de EPS;
- Estudo de gaseificação de resíduos de EPS.

REFERÊNCIAS

ABIPLAST, Associação Brasileira da Indústria do Plástico (2012). **Perfil 2012 – Indústria Brasileira de Transformação de Material Plástico**. Disponível em: <<http://www.abiplast.org.br/site/estatisticas>>. Acesso em: 15 mar. 2014.

ABRAPEX, Associação Brasileira do Poliestireno Expandido (2008). **O EPS e o meio ambiente**. Disponível em: <http://www.termoeps.com.br/meioambiente_folheto.htm>. Acesso em: 13 jun. 2014.

ACV BRASIL (2014). **Soluções computacionais – Ecoinvent v3**. Disponível em: <http://www.acvbrasil.com.br/solucoes-computacionais/ecoinvent-v3/>>. Acesso em: 03 mar. 2015.

AGOUA, E.; ALLOGNON-HOUÉSSOU, E.; ADJOVI, E.; TOGBEDJI, B. Thermal conductivity of composites made of wastes of wood and expanded polystyrene. **Construction and Building Materials**, v. 41, p. 557–562, apr. 2013.

ALMEIDA, J. **Introdução à Indústria do Petróleo**. Rio Grande: FURG-CTI, 2006. 76p.

ALSEMA, E. A. Energy Requirements of Thin-film Solar Cell Modules: a review. **Renewable Sustainable Energy**, v.2, p.387-415, 1998.

AMIANTI, M.; BOTARO, V. R.; Recycling of EPS: A new methodology for production of concrete impregnated with polystyrene (CIP). **Cement & Concrete Composites**, v. 30, p. 23–28, jan. 2008.

ANDRADY, A. L. **Plastics and the Environment**. John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey, 2003. 19p.

ANEEL (2015), Espaço do consumidor, **Perdas de energia**. Disponível em: <[://www.aneel.gov.br/area.cfm?idArea=801](http://www.aneel.gov.br/area.cfm?idArea=801)>. Acesso em: 15 mar. 2015.

ANP, Agência Nacional de Petróleo (2009). **Esquemas de produção no refino do petróleo**. Disponível em: <<http://www.anp.gov.br/?pg=7854&m=&t1=&t2=&t3=&t4=&ar=&ps=&cachebust=1414425520597>>. Acesso em: 27 jul. 2014.

ANP, Agência Nacional do Petróleo (2010). **O que é refino?** Disponível em: <<http://www.anp.gov.br/?pg=15699&m=&t1=&t2=&t3=&t4=&ar=&ps=&cachebust=1414376065293>>, Acesso em: 27 jul. 2014.

ANP, Agência Nacional do Petróleo (2013). **Anuário Estatístico 2013**. Disponível em: <http://www.anp.gov.br/?pg=71777&m=&t1=&t2=&t3=&t4=&ar=&ps=&cachebust=1414378718803#Se__o_2>. Acesso em 27 jul. 2014.

ANTUNES, A. **Setores da indústria química orgânica**. Rio de Janeiro: E-papers, 2007. 242p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 14040**: Gestão ambiental - Avaliação do ciclo de vida - Princípios e estrutura. Rio de Janeiro, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 14044**: Gestão ambiental - Avaliação do ciclo de vida - Requisitos e orientações. Rio de Janeiro, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ISO/TR 14049**: Gestão ambiental – Avaliação do ciclo de vida — Exemplos ilustrativos de como aplicar a ABNT NBR ISO 14044 à definição de objetivo e escopo e à análise de inventário. Rio de Janeiro, 2014.

ARVANITOYANNIS, I. S.; ISO 14040: Life Cycle Assessment (LCA) –Principles and Guidelines. **Waste Management for the Food Industries**, p. 97-126, 2008.

BAJDUR, W.; PAJACZKOWSKA, J.; MAKARUCHA, B.; SULKOWSKA, A.; SULKOWSKI, W.; Effective polyelectrolytes synthesized from expanded polystyrene wastes. **European Polymer Journal**, v. 38, n.2, p. 299-304, feb. 2002.

BAUMANN, H.; TILLMAN, A. M., **The hitch hiker's guide to LCA**. Studentlitteratur AB, Lund, Sweden, 2004. 544p.

BEN, **Balanco Energético Nacional 2014: Ano base 2013**. Empresa de Pesquisa Energética (EPE). Rio de Janeiro, 2014. 288p.

BJÖRKLUND, A.; FINNVEDEN, G.; Recycling revisited—life cycle comparisons of global warming impact and total energy use of waste management strategies. **Resources, Conservation and Recycling**. v. 44, p. 309–317, feb. 2005.

BORSOI, C.; SCIENZA, L. C.; ZATTERA, A. J.; Characterization of composites based on recycled expanded polystyrene reinforced with curaua fibers. **Journal of Applied Polymer Science**. v.128, iss.1, p.653–659, apr. 2013.

BOUSTEAD, I. **Eco-profiles of the European plastics industry, Report 2: Olefin feedstock sources**. European Centre for Plastics in the Environment (PWMI), Brussels, 1993a.

BOUSTEAD, I. **Eco-profiles of the European plastics industry, Report 4: Polystyrene**. European Centre for Plastics in the Environment (PWMI), Brussels, 1993b.

BOUSTEAD, I.; HANCOCK, G.F. **Handbook of industrial energy analysis**. Ellis Horwood Ltd., Chichester, 1979. 422p.

BUSINESS WIRE (2014). **Research and Markets: Polystyrene (PS) and Expandable Polystyrene (EPS) Global Market to 2020**. Disponível em: <<http://www.businesswire.com/news/home/20120110006782/en/Research-Markets-Polystyrene-PS-Expandable-Polystyrene-EPS#.VEwaKhaq92U>> Acesso em: 25 jul. 2014.

CB&I (2012). **Ethylbenzene/Styrene Monomer**. Disponível em: <www.CBI.com/lummus-technology>, Acesso em: 30 jul. 2014.

CETESB (2012). **Ficha de Informação Toxicológica – FIT**. Disponível em: <<http://www.cetesb.sp.gov.br/userfiles/file/laboratorios/fit/etilbenzeno.pdf>>, Acesso em: 29 jul. 2014.

CHOI, N. W.; OHAMA, Y.; Development and testing of polystyrene mortars using waste EPS solution-based binders. **Construction and Building Materials**, v.18, iss.4, p.235-241, jan. 2004.

CURRAN, M. A.; NOTTEN, P. **Summary of global life cycle inventory data resources**. Task Force 1: Database Registry SETAC/UNEP Life Cycle Initiative (2006). 34p. Disponível em: <http://www.epa.gov/ordntrnt/ORD/NRMRL/std/lca/pdfs/summary_of_global_lci_data_resources.pdf>. Acesso em: 30 jul. 2014.

DOW Chemical Company (2007). **Product Safety Assessment: Pentane**. Disponível em: <http://msdssearch.dow.com/PublishedLiteratureDOWCOM/dh_0082/0901b8038008211a.pdf?filepath=productsafety/pdfs/noreg/233-00293.pd...&fromPage=GetDoc>, Acesso em: 30 jul. 2014.

ECOINVENT CENTRE, **Database v.3.1 (2014)**. Disponível em: <<http://www.ecoinvent.org/login-databases.html>>. Acesso em: 15 abr. 2015.

EKVALL, T. and TILLMAN A.-M., Open-Loop Recycling: Criteria for Allocation Procedures. **International Journal of Life Cycle Assessment**, v.2, iss.3, p.155-162, 1997.

EPD – Environmental Product Declarations (2008), **EPD Supporting Annexes**. The International EPD Corporation. Disponível em: <http://www.environdec.com/Documents/GPI/EPD_annexes_080229.pdf>. Acesso em: 20 jan. 2015.

EPS Industry Alliance (2012). **Expanded Polystyrene Packaging Environmental Profile Analysis**. A presentation of quantified environmental life cycle product information for expanded polystyrene (EPS) packaging systems. Crofton, 2013. 4p. Disponível em: <www.epsindustry.org/sites/default/files/Environmental_Profile_Analysis.pdf>. Acesso em: 14 jul. 2014.

EPS RECYCLING (2014). **Reuse of EPS through Three Recycling Processes**. Disponível em: <<http://www.eps-recycling.net/reuse-of-eps-through-three-recycling-processes/>>. Acesso em 14 abr. 2014.

EUMEPS, European Association of Expanded Polystyrene (2001). **Life Cycle Assessment of the Industrial Use of Expanded Polystyrene Packaging in Europe**, Case Study: Packaging System for TV. 141p. Disponível em: <http://www.anape.es/pdf/gabinete_oi.pdf>. Acesso em: 18 feb. 2015.

EUMEPS, European Association of Expanded Polystyrene (2002a). **It increases to 45% European rate of recycling of EPS**. Disponível em: <<http://www.ecopse.fr/userfiles/file/annexe/Eumeps.pdf>>. Acesso em: 10 mar.2014.

EUMEPS, European Association of Expanded Polystyrene (2002b). **EPS The Environmental Truth – Results of the Life Cycle Assessment**. Belgium. 4p. Disponível em: <<http://www.eumeps.construction/show.php?ID=4465&psid=hmotjteo>>. Acesso em: 20 feb. 2014.

EUMEPS, European Association of Expanded Polystyrene (2011). **Life Cycle Assessment of the Industrial Use of Expanded Polystyrene Packaging in Europe**, Case Study: Comparison of Three Fishbox solutions, France. 148p. Disponível em: <http://www.fishboxes.info/wp-content/uploads/2012/04/EUMEPS_report_PwC_112211.pdf>. Acesso em: 15 feb. 2015.

EUROPEAN COMMISSION JOINT RESEARCH CENTRE (2003). **European Union Risk Assessment Report n-Pentane**, European Chemicals Bureau, v. 40. Disponível em: <<http://echa.europa.eu/documents/10162/b6f65b28-ff8b-4ba9-a66e-61dc245fc262>>. Acesso em: 29 jul. 2014.

EVANS D. G., ROSS S. D. Life cycle analysis of produce boxes: comparison of expanded polystyrene and corrugated cardboard. Melbourne: University of Melbourne, 1996.

FABI, A. R. **Comparação do consumo de energia e emissão de CO₂ entre garrafas de PET e de vidro, utilizando análise de ciclo de vida**. 2004. 122p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2004.

FRISCHKNECHT, R.; JUNGBLUTH, N.; ALTHAUS, H.-J.; BAUER, C.; DOKA, G.; DONES, R.; HELLWEG, S.; HISCHIER, R.; HUMBERT S.; MARGNI, M.; NEMECEK, T. **Implementation of life cycle impact assessment methods**. Ecoinvent report No. 3, v.2.0. Swiss Centre for Life Cycle Inventories, Dübendorf, CH, 2007.

FRISCHKNECHT, R.; WYSS, F.; KNÖPFEL, S.B.; LÜTZKENDORF, T.; BALOUKTSI, M. Cumulative energy demand in LCA: the energy harvested approach. **Int J Life Cycle Assess** v.20, p.957–969, may. 2015.

GÁSTECH (2014). **Alta Tecnologia em Conversão a gás. GNV – Gás Natural Veicular**. Disponível em: <<http://sites.amarillasinternet.com/gastech/gnv.html>>. Acesso em: 18 ago. 2014.

GARY; J.H.; HANDWERK, G. E. **Petroleum Refining: Technology and Economics**. 4th. New York: Marcel Dekker, Inc, 2001. 455p.

GEDDES, P. An analysis of the principles of economics. In: PROCEEDINGS OF THE ROYAL SOCIETY OF EDINBURG, 12, 1884, p.943-980.

GHG Management Institute (2015). **What is a global warming potential? And which one do I use**. Disponível em: <<http://ghginstitute.org/2010/06/28/what-is-a-global-warming-potential/>>. Acesso em: 15 mai. 2015.

GROTE, Z. C. V.; SILVEIRA, J. L. Estudo faz Análise Energética e Exergética de um Processo de Reciclagem de EPS. **Plástico Industrial**, v.59, n.5, p.108-121, 2003.

GUO, M.; MURPHY, R. J., Is There a Generic Environmental Advantage for Starch-PVOH Biopolymers Over Petrochemical Polymers? **Journal of Polymers and the Environment**, v.20, p.976–990, jul. 2012.

GUTIÉRREZ, C.; GARCÍA, M.T.; GRACIA, I.; DE LUCAS, A.; RODRÍGUEZ, J. F.; Recycling of extruded polystyrene wastes by dissolution and supercritical CO₂ technology. **Journal of Material Cycles and Waste Management**, v.14, p.308–316, oct. 2012.

HAMAD, K.; KASEEM, M.; DERI, F. Recycling of waste from polymer materials: An overview of the recent Works. **Polymer Degradation and Stability**, v.98, iss.12, p.2801-2812, dec 2013.

HERNÁNDEZ-ZARAGOZA, J. B.; LÓPEZ-LARA, T.; HORTA-RANGEL, J.; LÓPEZ-CAJÚN, C.; ROJAS-GONZÁLEZ, E.; GARCÍA-RODRIGUEZ, F. J.; ADUE, J.; Cellular Concrete Bricks with Recycled Expanded Polystyrene Aggregate. **Advances In Materials Science And Engineering**, v.2013, p.1-5, oct. 2013.

RÖHRLICH, M.; MISTRY, M.; MARTENS, P.N.; BUNTENBACH, S.; RUHRBERG, M.; DIENHART, M.; BRIEM, S.; QUINKERTZ, R.; ALKAN, Z.; KUGELER, K. A Method to Calculate the Cumulative Energy Demand (CED) of Lignite Extraction. **Int. J. LCA**, v.5, p.369-373, 2000.

HOLTZ, R. D. **Obtenção de catalisadores de vanádio e magnésio suportados em carvão ativado para a produção de estireno**. 2008. 111p. Dissertação (Mestrado em Química) – Instituto de Química, Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2008.

HOPEWELL, J., DVORAK, R., KOSIOR, E., Plastics recycling: challenges and opportunities. **Philosophical Transactions of the Royal Society B**, v.364, iss.1526, p. 2115-2126, 2009.

HOUGHTON, J. T.; FILHO, L. G. M.; CALLANDER, B. A.; HARRIS, N.; KATTENBERG, A.; MASKELL, K. **Climate Change 1995: the Science of Climate Change**. Contribution of WGI to the Second Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (1996). New York: Cambridge University Press, 588p. Disponível em: <https://www.ipcc.ch/ipccreports/sar/wg_I/ipcc_sar_wg_I_full_report.pdf>. Acesso em: 03 mar. 2015.

HOUGHTON, J.T.; DING, Y.; GRIGGS, D.J.; NOGUER, M.; VAN DER LINDEN, P.J.; DAI, X.; MASKELL, K.; JOHNSON, C.A. **Climate Change 2001: the Scientific Basis**. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (2001). New York: Cambridge University Press, 94p. Disponível em: <http://www.grida.no/climate/ipcc_tar/wg1/pdf/wg1_tar-front.pdf>. Acesso em: 03 mar. 2015.

HUNT, R.G.; FRANKLIN, W.E.; WELCH, R.O.; CROSS, J.A.; WOODAL, A.E. **Resource and environmental profile analysis of nine beverage container alternatives.** Midwest Research Institute for U.S. Environmental Protection Agency, Washington DC, 1974.

IFIAS, International Federation of Institutes for Advanced Studies. Report on the Workshop on Energy Analysis and Economics (in Lindigoe , Sweden, June 1975). **Resources and Energy**, v.1, p.151-204, 1978.

IPCC (2006a). **Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, Volume 2: Energy**, Chapter 2: Stationary Combustion. Disponível em: < http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/pdf/2_Volume2/V2_2_Ch2_Stationary_Combustion.pdf>. Acesso em: 13 mar. 2014.

IPCC (2006b). **Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, Volume 2: Energy**, Chapter 3: Mobile Combustion. Disponível em: < http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/pdf/2_Volume2/V2_3_Ch3_Mobile_Combustion.pdf>. Acesso em 13 mar. 2014

IPCC (2013). **Climate Change 2013: The Physical Science Basis.** Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. New York: Cambridge University Press, 1535p. Disponível em: < http://www.climatechange2013.org/images/report/WG1AR5_ALL_FINAL.pdf>. Acesso em: 11 mar. 2015.

KANG, D.; SGRICCIA, N.; SELKE, S.; AURAS, R., Comparison of bacon packaging on a life cycle basis: a case study. **Journal of Cleaner Production**, v.54, p.142-149, 2013.

KLÖPPFER, W. In defense of the cumulative energy demand (editorial). **International Journal of Life Cycle Assessment**, v.2, iss.2, p.61, jun. 1997.

KNIGHT, A.; WOLFE, J.; POON, J. **Life Cycle Assessment.** Toronto: ICF Kaiser Canada, 1996. 35p.

LEE, E. H.; Catalysis Rev. Science Engineering, v.8, p. 285, 1963.

LEE, S. J.; JEOUNG, H. G.; AHN, K. H. **J. Appl. Polym. Sci.**, v.89, p.3672, 2003.

LEITE, H. E. B.; OLIVEIRA, A. C.; RANGEL, M. C.; Ação promotora do zinco em catalisadores de síntese do estireno. **Química Nova**, v.27, n.2, p.247-250, 2004.

LO MONTE, F.; BAMONTE, P.; GAMBAROVA, P. G.; Physical and mechanical properties of heat-damaged structural concrete containing expanded polystyrene synthesized particles. **Fire and Materials**. v. 39, p.58-71, 2015.

MACIEIRA, R. P. **Produção de compósito do tipo gesso-polímero para aplicação na fabricação de painéis externos em edificações**. 2011. 96p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Católica de Pernambuco, Recife, 2011.

MADIVAL, S.; AURAS. R.; SINGH, S. P.; NARAYAN, R.; Assessment of the environmental profile of PLA, PET and PS clamshell containers using LCA methodology. **Journal of Cleaner Production**, v.17, p.1183–1194, 2009.

MELO, C. A., **A expansão do Sistema de distribuição de gás natural no Brasil: a dinâmica dos investimentos, da renda e das emissões de CO₂**. 2005. 81p. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2005.

MERCHANT RESEARCH & CONSULTING ITD (2014a). **Styrene: 2014 World Market Outlook and Forecast up to 2018**. Disponível em: <<http://mcgroup.co.uk/researches/styrene>>. Acesso em: 25 mar. 2014.

MERCHANT RESEARCH & CONSULTING ITD (2014b). **Expandable Polystyrene (EPS): 2014 World Market Outlook and Forecast up to 2018**. Disponível em: <<http://mcgroup.co.uk/researches/expandable-polystyrene-eps>>. Acesso em: 25 mar. 2014.

MIRANDA, M. M. **Fator de emissão de gases de efeito estufa da geração de energia elétrica no Brasil: implicações da aplicação da Avaliação do Ciclo de Vida**. 2012. 162p. Dissertação (Mestrado). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2012.

MMA, Ministério do Meio Ambiente (2014). **Gás Natural**. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/clima/energia/fontes-convencionais-de-energia/gas-natural>>. Acesso em: 27 jul. 2014.

MONTENEGRO, R. S. P.; SERFATY, M. E. **Aspectos gerais do poliestireno**. Rio de Janeiro: BNDES Setorial, p. 123-136, v. 16, set. 2002.

MOURAD, A.L.; GARCIA, E.E.C.; VILHENA, A. **Avaliação do ciclo de vida: princípios e aplicações**. CETEA/CEMPRE, Campinas, 2002. 92p.

MUNDO EDUCAÇÃO (2014). **Poliestireno**. Disponível em: <<http://www.mundoeducacao.com/quimica/poliestireno.htm>>. Acesso em 24 jul. 2014.

NETZER, D. Benzene supply trends and proposed method for enhanced recovery. In: 2005 WORLD PETROCHEMICAL CONFERENCE, 2005, Houston. Disponível em: <<http://www.petrochemicals.dnetzer.net/articles/article-3.05.pdf>>. Acesso em: 27 jul. 2014.

NICHOLSON, A.L. et al. End-of-life LCA allocation methods: Open loop recycling impacts on robustness of material selection decisions. In: ISSST '09. PROCEEDINGS OF THE 2009 IEEE INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON SUSTAINABLE SYSTEMS AND TECHNOLOGY, Washington. 2009. p.1-6.

NOGUCHI, T.; MIYASHITA, M.; INAGAKI, Y.; WATANABE, H.; A New Recycling System for Expanded Polystyrene using a Natural Solvent. Part 1. A New Recycling Technique. **Packag. Technol. Sci.** v.11, p.19-27, 1998.

OLIVEIRA, A.C. et al. Efeito do cromo nas propriedades catalíticas da MCM-41. **Química Nova.** v.28, n.1, p.37-41, 2005.

PARGANA, N. G. S. C., **Environmental impacts of the life cycle of thermal insulation materials of buildings**. Dissertation (Master in Environmental Engineering), Técnico Lisboa, September 2012.

PATEL, M.; Cumulative energy demand (CED) and cumulative CO₂ emissions for products of the organic chemical industry. **Energy.** v.28, p.721–740, 2003.

PETROBRÁS. **Processos de Refino**. Curitiba: Petrobrás, 2002.

PLASTEMART (2013). **Polystyrene and EPS market expected to grow at a healthy rate of 5.6% from 2010-2020**. Disponível em: <<http://www.plastemart.com/Plastic-Technical-Article.asp?LiteratureID=1916&Paper=polystyrene-expandable-polystyrene-eps-market-to-grow-healthy-rate-5.6-percent-from-2010-2020>>. Acesso em: 15 jul. 2014.

PLÁSTICOS EM REVISTA (2014). **Edição 601/Especial**. Disponível em: <<http://plasticosemrevista.com.br/index.php/component/content/article/123-edicao-601/675-edicao-601-especial>> Acesso em 26 jun. 2014.

PLASTICS EUROPE (2006). **Eco-profiles of the European Plastics Industry, POLYSTYRENE (Expandable)(EPS)**, 2006.

PLASTICS EUROPE (2012). **Eco-profiles and Environmental Product Declarations of the European Plastics Manufacturers, General-Purpose Polystyrene (GPPS) and High-Impact Polystyrene (HIPS)**. Disponível em: <http://www.plasticseurope.org/Documents/Document/20100312112214-FINAL_POLYSTYRENE_GPPS_111209-20090428-003-EN-v1.pdf>. Acesso em: 15 ago. 2014.

PLASTICS EUROPE (2013). **Plastics – the Facts 2013, An analysis of European latest plastics production, demand and waste data**, Disponível em: <<http://www.plasticseurope.org/Document/plastics-the-facts-2013.aspx?FolID=2>>. Acesso em 10 mar. 2014.

PLASTICS EUROPE (2015). **What does feedstock energy mean?**, Disponível em: <<http://www.plasticseurope.org/plastics-sustainability-14017/life-cycle-thinking-1746/frequently-asked-questions/what-does-feedstock-energy-mean.aspx>>. Acesso em 10 abr. 2015.

PLASTICS NEW ZEALAND (2014). **EPS Properties and Processing**. Disponível em: <<http://www.plastics.org.nz/factsandresources/typesofplastic/expandedpolystyrene/EPSproperties/>> Acesso em 16 abr. 2014.

PLASTIVIDA, Instituto Sócio-Ambiental dos Plásticos (2013). **Brasil recicla 34,5% do EPS pós-consumo**. Disponível em: <http://www.plastivida.org.br/2009/Releases_092.aspx>. Acesso em: 10 mar. 2014.

POLETTO, M.; DETTENBORN, J.; ZENI, M., ZATTERA, A. J., Characterization of composites based on expanded polystyrene wastes and wood flour. **Waste Management** v.31, p.779–784, 2011.

PRADO, M. R. **Análise do inventário do ciclo de vida de embalagens de vidro, alumínio e PET utilizadas em uma indústria de refrigerantes no Brasil**. 2007. 188p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2007.

PRIBERAM, **Dicionário da Língua Portuguesa**. Disponível em: <<http://www.priberam.pt/dlpo/>>. Acesso em 20 dez. 2014.

PROGRAMA BRASILEIRO GHG PROTOCOL (2014). **Contabilização, Quantificação e Publicação de Inventários Corporativos de Emissões de Gases de Efeito Estufa**. Segunda Edição Disponível em: <<http://www.ghgprotocolbrasil.com.br/index.php?r=site/CapaSecao&id=2>>. Acesso em 15 out. 2014.

RAMÍREZ, P. **Análise de Métodos de Alocação Utilizados em Avaliação do Ciclo de Vida**. 2009. 138p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2009.

RIBEIRO, P. H. **Contribuição ao banco de dados brasileiro para apoio à avaliação do ciclo de vida: fertilizantes nitrogenados**. 2009. 343p. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009.

ROSS, S.; EVANS, D., The environmental effect of reusing and recycling a plastic-based packaging system, **Journal of Cleaner Production**. v.11, p.561–571, 2003.

ROVERE, J.; CORREA, C.A.; GRASSI, V. G.; DAL PIZZOL, M.F., Caracterização Morfológica do Poliestireno de Alto Impacto (HIPS). **Polímeros: Ciência e Tecnologia**. v.18, nº1, p.12-19, 2008.

SANTOS, M. F. N.; BATTISTELLE, R. A. G.; HORI, C. Y.; JULIOTI, P. S., Importância da avaliação do ciclo de vida na análise de produtos: possíveis aplicações na construção civil. **GEPROS - Gestão da Produção, Operações e Sistemas** – Ano 6, nº 2, p. 57-73, abr-jun 2011.

SCHEIRS, J. **Polymer recycling. Science, technology and applications**. John Wiley & Sons. New York, 1998. 591p.

SCHEIRS, J.; PRIDDY, D. B., **Modern Styrenic Polymers: Polystyrenes and Styrenic Copolymers**. John Wiley & Sons, Ltd, 2003.

SCHMIDT, P. N. S. **A qualidade de placas de circuito impresso confeccionadas a partir de poliestireno reciclado**. 2012. 79p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, Guaratinguetá, 2012.

SILVA, G. A.; KULAY, L. A., **Avaliação do Ciclo de Vida**. In: VILELA, A; DEMAJOROVIC, J. Modelos e Ferramentas de Gestão Ambiental: desafios e perspectivas para as organizações. São Paulo: Editora SENAC, 2006.

SILVA, D. A. L. **Avaliação do ciclo de vida da produção do painel de madeira MDP no Brasil**. 2012. 207p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2012.

SOUSA E SILVA, **Estudo da adsorção de polieletrólitos e do ordenamento molecular de filmes poliméricos automontados através da óptica não-linear**. 2010. 154p. Tese (Doutorado) – Instituto de Física de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2010.

SPINACÉ, M. A. S.; PAOLI, M. A. A tecnologia da reciclagem de polímeros, **Química Nova**. v.28 n.1, jan-fev. 2005.

SUWANMANEE, U.; VIGANDA VARABUNTOONVIT, V.; CHAIWUTTHINAN, P.; TAJAN, M.; MUNGCHAROEN, T.; LEEJARKPAI, T.; Life cycle assessment of single use thermoform boxes made from polystyrene (PS), polylactic acid, (PLA), and PLA/starch: cradle to consumer gate. **Int J Life Cycle Assess.** v.18, p.401–417, 2013.

SZKLO, A. S.; ULLER, V. C. **Fundamentos do refino de petróleo: tecnologia e economia**. 2ªed. Rev. e ampl. – Rio de Janeiro: Interciência, 2008.

TAGUCHI, Y.; TANAKA, M. Preparation of composite particles made from solid powders and wasted plastics by semichemical recycle method. **Journal of Applied Polymer Science**. v.88, p.483-488, 2003.

TAN, R. B. H.; KHOO, H. H., Life Cycle Assessment of EPS and CPB inserts: design considerations and end of life scenarios, **Journal of Environmental Management**. v.74, p.195-205, 2005.

TESSARI, J. **Utilização de poliestireno expandido e potencial de aproveitamento de seus resíduos na construção civil**. 2006. 102p. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2006.

THE PLASTICS PORTAL (2014). **Polystyrene (PS)**. Disponível em: <<http://www.plasticseurope.org/what-is-plastic/types-of-plastics-11148/polystyrene.aspx>>. Acesso em 14 abr. 2014.

UNEP - United Nations Environment Programme (2011). **Life Cycle Assessment**. Disponível em: <<http://www.unep.org/resourceefficiency/Consumption/StandardsandLabels/MeasuringSustainability/LifeCycleAssessment/tabid/101348/Default.aspx>>. Acesso em 03 abr. 2014.

VDI-Richtlinien (1997): **Cumulative Energy Demand-Terms, Definitions, Methods of Calculation**. VDI - Guideline 4600, Beuth Verlag GmbH, Berlin.

XUE, F.; TAKEDA, D.; KIMURA, T.; MINABE, M.; Effect of organic peroxides on the thermal decomposition of expanded polystyrene with the addition of α -methylstyrene. **Polymer Degradation and Stability**, v.83, iss.3, p.461-466, mar. 2004.