

UNIVERSIDADE FEDERAL DO ABC – UFABC  
CENTRO DE ENGENHARIA, MODELAGEM E CIÊNCIAS SOCIAIS APLICADAS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E TECNOLOGIA AMBIENTAL

Jéssika Souza de Carvalho

**DESENVOLVIMENTO E CARACTERIZAÇÃO DE FILMES POLIMÉRICOS  
BIODEGRADÁVEIS PARA APLICAÇÃO EM SACOLAS DESCARTÁVEIS E SUA  
ANÁLISE DE ECOEFICIÊNCIA**

Dissertação

Santo André - SP

2017

Jéssika Souza de Carvalho

DESENVOLVIMENTO E CARACTERIZAÇÃO DE FILMES POLIMÉRICOS  
BIODEGRADÁVEIS PARA APLICAÇÃO EM SACOLAS DESCARTÁVEIS E SUA  
ANÁLISE DE ECOEFICIÊNCIA

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia Ambiental da Universidade Federal do ABC, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Ciência e Tecnologia Ambiental. Linha de pesquisa: Tecnologias Ambientais

Orientador: Prof. Dr. Derval dos Santos Rosa

Santo André – SP

2017

**Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal do ABC**  
Elaborada pelo Sistema de Geração de Ficha Catalográfica da UFABC  
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Carvalho, Jéssika Souza de  
DESENVOLVIMENTO E CARACTERIZAÇÃO DE FILMES POLIMÉRICOS  
BIODEGRADÁVEIS PARA APLICAÇÃO EM SACOLAS DESCARTÁVEIS E  
SUA ANÁLISE DE ECOEFICIÊNCIA / Jéssika Souza de Carvalho. — 2017.

218 fls.

Orientador: Derval dos Santos Rosa

Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do ABC, Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia Ambiental, Santo André, 2017.

1. Avaliação do Ciclo de Vida. 2. Polímeros Biodegradáveis. 3. Análise de Ecoeficiência. 4. Resíduos Sólidos Urbanos. 5. Sacolas Descartáveis. I. Rosa, Derval dos Santos. II. Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia Ambiental, 2017. III. Título.

DECLARAÇÃO DE ATENDIMENTO ÀS OBSERVAÇÕES DA BANCA  
EXAMINADORA

Este exemplar foi revisado e alterado em relação à versão original, de acordo com as observações levantadas pela banca no dia da defesa, sob responsabilidade única do autor e com a anuência de seu orientador.

Santo André, 26 de abril de 2017

Assinatura do Autor: *Jessika Souza de Carvalho*

*Amil de Paula*  
Assinatura do Orientador:



**MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO**  
**Fundação Universidade Federal do ABC**  
**Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia Ambiental**  
Avenida dos Estados, 5001 – Bairro Santa Terezinha – Santo André – SP  
CEP 09210-580 · Fone: (11) 4996-0017  
pgcta@ufabc.edu.br

### FOLHA DE ASSINATURAS

Assinaturas dos membros da Banca Examinadora que avaliou e aprovou a Defesa de Dissertação de Mestrado da candidata Jéssika Souza de Carvalho, realizada em 26 de janeiro de 2017:

---

Prof.(a) Dr.(a) **Derval dos Santos Rosa** (UFABC) – Presidente

---

Prof.(a) Dr.(a) **Lucia Helena Gomes Coelho** (UFABC) – Membro Titular

---

Prof.(a) Dr.(a) **Alcides Lopes Leao** (UNESP) – Membro Titular

---

Prof.(a) Dr.(a) **Roseli Frederigi Benassi** (UFABC) – Membro Suplente

---

Prof.(a) Dr.(a) **Esperidiana Augusta Barretos de Moura** (IPEN) – Membro Suplente

## DEDICATÓRIA

*À minha filha Millena, pela paciência e compreensão durante a minha ausência em alguns momentos e por iluminar minha vida;*

*Ao meu esposo Diego, pela compreensão, amizade, amor, apoio e incentivo de sempre;*

*Aos meus pais, Sandra e Vilso, por todo apoio e educação que recebi durante toda minha vida;*

*À minha irmã Bianca, pela compreensão e ajuda em todos os momentos.*

*A vocês dedico esta conquista!*

## AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus, pela oportunidade de vivenciar a cada dia a dádiva da vida.

Ao Prof. Dr. Derval dos Santos Rosa, pela orientação segura, pelos ensinamentos, amizade, apoio, incentivo e exemplo.

À grande amiga Sueli, não somente por sua parceria e atuação nesse trabalho, mas também por sua paciência, compreensão e amizade.

Aos integrantes da banca examinadora de qualificação e defesa: Profa. Dra. Roseli Frederigi Benassi, Profa. Dra. Lúcia Helena Gomes Coelho e Prof. Dr. Alcides Lopes Leão, pelas análises e sugestões para o enriquecimento desta pesquisa.

Aos meus amigos do Laboratório de Polímeros, em especial, Alana, Clara, Daniel, Fabiany, José Ricardo, Julio Harada, Larissa e Paulo, pelo companheirismo, ajuda, paciência e amizade.

À Fundação Espaço ECO® pela parceria e disponibilidade dos bancos de dados e da ferramenta de Análise de Ecoeficiência.

A todos amigos da Fundação Espaço ECO®, pelos ensinamentos, amizade e apoio.

À Empresa que gentilmente nos forneceu os materiais para desenvolvimento dos filmes poliméricos.

À Universidade Federal do ABC pelo suporte financeiro.

Aos familiares, amigos, colegas, funcionários e professores, que direta ou indiretamente, contribuíram para o desenvolvimento deste trabalho.

A todos que torceram por mim.

Muito obrigada!

*“Importa muito, e acima de tudo, uma firme e determinada determinação de não parar até chegar à fonte de água viva, venha o que vier, suceda o que suceder, custe o que custar, murmure quem murmurar, quer chegue ao fim, quer morra no caminho, ou falte coragem para os sofrimentos que nele se encontram. Ainda que o mundo venha abaixo, havemos de prosseguir”.*

*Santa Teresa de Ávila*

## **PRODUÇÃO CIENTÍFICA E TECNOLÓGICA DURANTE O PERÍODO DO MESTRADO**

CARVALHO, J. S.; OLIVEIRA, S. A.; ROSA, D. S. Desenvolvimento de filmes poliméricos biodegradáveis para aplicação em sacolas descartáveis e sua Análise de Ecoeficiência. In: V Congresso Brasileiro em Gestão do Ciclo de Vida.

CARVALHO, J. S.; OLIVEIRA, S. A.; ROSA, D. S. Análise de Ecoeficiência para produção, utilização e destinação de sacolas descartáveis de supermercado. Anais do V Simpósio de Pesquisa do Grande ABC (SPGABC), outubro/ 2016

CARVALHO, J. S.; OLIVEIRA, S. A.; ROSA, D. S. Avaliação da biodegradação em solo simulado de filmes poliméricos compostos por Ecovio<sup>®</sup>, Ecoflex<sup>®</sup> e CaCO<sub>3</sub>. Anais do V Simpósio de Pesquisa do Grande ABC (SPGABC), outubro/ 2016

ROSA, D.S; CARVALHO, J.S; DIAS, E.H.O.; PERES, M.R.; OLIVEIRA, S.A. A degradação de resíduos plásticos e o tratamento de lodos de esgoto. In: Ciência e Tecnologia Ambiental - Conceitos e Perspectivas. 1ed.São Bernardo do Campo: Editora UFABC, 2016.

VALVERDE, M. C.; CARDOSO, A. O.; LESCREECK, M. C.; Malfatti, M. G.; RABELO, M. C.; CARVALHO, J. S.; SILVA, M. O. Variabilidades e Mudanças climáticas no Brasil: Análises de Extremos. In: Ciência e Tecnologia Ambiental - Conceitos e Perspectivas. 1ed.São Bernardo do Campo: Editora UFABC, 2016.

## TRABALHOS SUBMETIDOS

CARVALHO, J. S.; OLIVEIRA, S. A.; ROSA, D. S. Desenvolvimento de filmes poliméricos biodegradáveis para sacolas descartáveis e sua Análise de Ecoeficiência. In: 22º Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais.

CARVALHO, J. S.; MACEDO, J.R.N.; OLIVEIRA, S. A.; ROSA, D.S. Environmental, Economic and Technical Performance: A Comparative Study of Carrier Bags. In: 6th International Workshop Advances in Cleaner Production.

MACEDO, J.R.N.; CARVALHO, J. S.; OLIVEIRA, S. A.; ROSA, D.S. Avaliação do Ciclo de Vida aplicada no desempenho de compósitos de PLA com resíduo de algodão. In: 14º Congresso Brasileiro de Polímeros.

CARVALHO, J. S.; MACEDO, J.R.N.; OLIVEIRA, S. A.; ROSA, D.S. Environmental and technical performance: a comparison between conventional carrier bags and biodegradable films over the life cycle. In: The International Journal of Life Cycle Assessment.

CARVALHO, J. S.; ROCHA, D.B.; OLIVEIRA, S. A.; ROSA, D.S. Mechanical and thermal properties of PBAT/PLA/CaCO<sub>3</sub> biodegradable composites. In: Composites Part B: Engineering.

## RESUMO

Nos dias de hoje, tem sido crescente a preocupação com os impactos ambientais provocados pelo descarte inadequado de sacolas plásticas após seu uso. Em busca de uma solução parcial para o descarte dessas, nos últimos anos vem aumentando o interesse em incrementar e desenvolver materiais biodegradáveis com características que permitam a sua utilização em embalagens e utensílios descartáveis e que contribuam com a sustentabilidade. Esse trabalho teve como objetivo desenvolver filmes poliméricos biodegradáveis, para uso em sacolas descartáveis de supermercado. Os filmes foram preparados utilizando PBAT, PLA e  $\text{CaCO}_3$ , em diferentes composições. Os filmes das composições foram caracterizados por ensaios mecânicos e avaliação da biodegradação. Foram analisados também os desempenhos ambiental e econômico, ao longo do ciclo de vida dos filmes preparados, em comparação com sacolas usuais disponibilizadas nos supermercados (kraft e PEAD). Essa Análise de Ecoeficiência foi realizada segundo as normas ABNT NBR da série ISO 14040, com base em ferramentas de cálculo e bancos de dados de Avaliação de Ciclo de Vida internacionalmente reconhecidos. Os resultados do ensaio mecânico demonstraram que a incorporação de  $\text{CaCO}_3$  nos filmes diminuiu o alongamento na ruptura e a resistência máxima à tração e aumentou o módulo de Young dos materiais. Todas amostras apresentaram caráter hidrofílico, com ângulos de contato menores que  $90^\circ$ . As amostras com  $\text{CaCO}_3$  não apresentaram nítidas separação de fases, diferentemente da amostra sem carga, demonstrando que a incorporação do material favoreceu a dispersão e interação de PBAT/PLA. O  $\text{CaCO}_3$  reduziu a temperatura máxima de degradação das amostras. Com exceção da amostra de papel, todas apresentaram pequenos percentuais de massa sorvida. Após 360 dias do ensaio de biodegradação, os resultados mostraram que não houve uma perda de massa expressiva, no entanto, as amostras já apresentaram modificações superficiais, indicando ação de micro-organismos. Na Análise de Ecoeficiência foi possível observar que a incorporação de  $\text{CaCO}_3$  diminuiu significativamente os impactos econômicos das alternativas em estudo e favoreceu a ecoeficiência dos polímeros biodegradáveis.

**Palavras-chave:** Resíduos Sólidos Urbanos, Sacolas descartáveis, Polímeros biodegradáveis, Avaliação do Ciclo de Vida, Análise de Ecoeficiência.

## ABSTRACT

Nowadays, there has been growing concern about the environmental impacts caused by the improper disposal of disposable plastic bags after use. In search of a partial solution for their disposal, the interest in improving and developing biodegradable materials of low cost with characteristics that allow its use in disposable containers and utensils that contribute to the sustainability have increased in recent years. This work aimed to develop polymeric biodegradable films for use in disposable supermarket bags. The films were prepared using PBAT, PLA and CaCO<sub>3</sub>, in different compositions. These films were characterized by mechanical tests and evaluation of biodegradation. There were also analyzed the environmental and economic performance over the life cycle of the films prepared in comparison with the usual alternatives available in supermarkets (paper and PEAD). This Eco-efficiency Analysis was performed according to NBR ISO 14040 standards series, based on calculation internationally recognized tools and databases of Life Cycle Assessment. The results of the mechanical tests demonstrated that the incorporation of CaCO<sub>3</sub> in the films decreased the elongation at break and the maximum tensile strength at break of the materials, but increased the Young's modulus. All samples presented a hydrophilic character, with contact angles smaller than 90°. The samples with CaCO<sub>3</sub> did not present a clear phase separation, unlike the sample with no load, demonstrating that the incorporation of the material favors the interaction of PBAT with PLA. The CaCO<sub>3</sub> reduced the maximum degradation temperature of the samples. With the exception of the paper sample, all presented small percentage of sorbed mass. After 360 days of biodegradation test, the results showed that there was no significant mass loss, however, the samples already presented a superficial modifications, indicating action of microorganisms. In the Eco-efficiency Analysis it was possible to observe that the incorporation of CaCO<sub>3</sub> significantly decreased the economic impacts of the alternatives under study and favored the eco-efficiency of the biodegradable polymers.

**Key words:** Municipal Solid Waste, Disposable bags, Biodegradable polymers, Life Cycle Assessment, Eco-efficiency Analysis.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Dados da produção mundial de resinas termoplásticas em 2013 .....	53
Figura 2: Utilização dos plásticos no Brasil em 2015 .....	54
Figura 3: Ilustração da estrutura química do PBAT .....	64
Figura 4: Ilustração da estrutura química do PLA .....	65
Figura 5: Comportamento da rigidez das misturas de PBAT com diferentes proporções de PLA.....	67
Figura 6: Ilustração dos componentes de um compósito polimérico .....	68
Figura 7: Quantidade de citações por ano, relacionadas à <i>Life Cycle Assessment</i> (Avaliação do Ciclo de Vida) .....	73
Figura 8: Quantidade de artigos publicados por ano, relacionados à <i>Life Cycle Assessment e bags</i> .....	75
Figura 9: Quantidade de citações por ano, relacionadas à <i>Life Cycle Assessment e bags</i> .....	75
Figura 10: Interação entre as etapas da ACV .....	76
Figura 11: Quantidade de artigos publicados nos últimos dez anos, relacionados à <i>Eco-efficiency Analysis</i> .....	80
Figura 12: Quantidade de citações nos últimos dez anos, relacionadas à <i>Eco-efficiency Analysis</i> .....	81
Figura 13: Apresentação esquemática da metodologia geral empregada nesta dissertação .....	93
Figura 14: Ilustração de algumas amostras obtidas na forma de <i>pellets</i> .....	97
Figura 15: Ilustração dos detalhes dos <i>pellets</i> obtidos por extrusão .....	97
Figura 16: Ilustração do processo de extrusão dos filmes poliméricos .....	98
Figura 17: Ilustração de alguns corpos-de-prova: a) filmes desenvolvidos b) sacola de papel kraft c) sacola de polietileno de alta densidade .....	98
Figura 18: Curvas do comportamento tensão <i>versus</i> deformação dos materiais a) frágeis b) plásticos c) elastômeros .....	99
Figura 19: Ilustração do significado do ângulo de contato .....	100
Figura 20: Ângulo de contato: a) $\theta < 90^\circ$ , a água é absorvida pelo material; b) $\theta = 90^\circ$ , a água é parcialmente absorvida; c) $\theta > 90^\circ$ , a água não é absorvida.....	101
Figura 21: Ilustração das bandejas contendo solo simulado .....	103

Figura 22: Ilustração de alguns corpos-de-prova em bandejas contendo solo simulado.....	103
Figura 23: Esquema de disposição das amostras em solo simulado .....	104
Figura 24: Fases envolvidas no ciclo de vida de todas as alternativas analisadas .	110
Figura 25: Processo de manufatura das sacolas descartáveis .....	114
Figura 26: Valores médios do alongamento na ruptura e seus respectivos desvios padrão .....	123
Figura 27: Valores médios da resistência máxima à tração e seus respectivos desvios padrão .....	125
Figura 28: Valores médios do Módulo de Young e seus respectivos desvios padrão .....	126
Figura 29: Curvas médias do ensaio de tração das amostras representadas pelos filmes poliméricos desenvolvidos .....	127
Figura 30: Exemplo do mecanismo de deformação apresentado pelas amostras representadas pelos filmes poliméricos desenvolvidos .....	128
Figura 31: Curva tensão <i>versus</i> deformação da amostra S <sub>KRAFT</sub> .....	129
Figura 32: Perda de massa e estabilidade térmica da amostra E <sub>60</sub> P <sub>40</sub> C <sub>0</sub> .....	130
Figura 33: Perda de massa e estabilidade térmica da amostra E <sub>60</sub> P <sub>30</sub> C <sub>10</sub> .....	130
Figura 34: Perda de massa e estabilidade térmica da amostra E <sub>60</sub> P <sub>20</sub> C <sub>20</sub> .....	131
Figura 35: Perda de massa e estabilidade térmica da amostra E <sub>70</sub> P <sub>20</sub> C <sub>10</sub> .....	131
Figura 36: Perda de massa e estabilidade térmica da amostra E <sub>70</sub> P <sub>15</sub> C <sub>15</sub> .....	132
Figura 37: Perda de massa e estabilidade térmica da amostra S <sub>KRAFT</sub> .....	134
Figura 38: Perda de massa e estabilidade térmica da amostra S <sub>PEAD</sub> .....	134
Figura 39: Ângulo de contato médio das amostras e seus respectivos desvio padrão .....	135
Figura 40: Ilustração da gota sobre a superfície da amostra obtida no ensaio do ângulo de contato .....	136
Figura 41: Valores percentuais de massa sorvida das amostras analisadas .....	138
Figura 42: Fotomicrografias, obtidas por MEV, da amostra E <sub>60</sub> P <sub>40</sub> C <sub>0</sub> , com aumentos de 100 X, 250 X, 1000 X e 3000 X .....	140
Figura 43: Figura 36: Fotomicrografias, obtidas por MEV, da amostra E <sub>60</sub> P <sub>30</sub> C <sub>10</sub> , com aumentos de 100 X, 250 X, 1000 X e 3000 X .....	140
Figura 44: Fotomicrografias, obtidas por MEV, da amostra E <sub>60</sub> P <sub>20</sub> C <sub>20</sub> , com aumentos de 100 X, 250 X, 1000 X e 3000 X.....	141

Figura 45: Fotomicrografias, obtidas por MEV, da amostra E <sub>70</sub> P <sub>20</sub> C <sub>10</sub> , com aumentos de 100 X, 250 X, 1000 X e 3000 X.....	141
Figura 46: Fotomicrografias, obtidas por MEV, da amostra E <sub>70</sub> P <sub>15</sub> C <sub>15</sub> , com aumentos de 100 X, 250 X, 1000 X e 3000 X.....	142
Figura 47: Fotomicrografias, obtidas por MEV, da amostra S <sub>KRAFT</sub> , com aumentos de 100 X, 250 X, 1000 X e 3000 X.....	143
Figura 48: Fotomicrografias, obtidas por MEV, da amostra S <sub>PEAD</sub> , com aumentos de 100 X, 250 X, 1000 X e 3000 X.....	144
Figura 49: Ilustração da presença de micro-organismos no solo simulado durante o ensaio de biodegradação.....	145
Figura 50: Variação de massa da amostra E <sub>60</sub> P <sub>40</sub> C <sub>0</sub> durante o ensaio de biodegradação.....	146
Figura 51: Variação de massa da amostra E <sub>60</sub> P <sub>30</sub> C <sub>10</sub> durante o ensaio de biodegradação.....	147
Figura 52: Variação de massa da amostra E <sub>60</sub> P <sub>20</sub> C <sub>20</sub> durante o ensaio de biodegradação.....	147
Figura 53: Variação de massa da amostra E <sub>70</sub> P <sub>20</sub> C <sub>10</sub> durante o ensaio de biodegradação.....	148
Figura 54: Variação de massa da amostra E <sub>70</sub> P <sub>15</sub> C <sub>15</sub> durante o ensaio de biodegradação.....	148
Figura 55: Valores médios da variação de massa da amostra S <sub>KRAFT</sub> em relação ao tempo de biodegradação em solo simulado.....	150
Figura 56: Ilustração da amostra S <sub>KRAFT</sub> após o período de 30 dias do ensaio de biodegradação.....	151
Figura 57: Fotomicrografia da amostra S <sub>PEAD</sub> , após 360 dias do ensaio de biodegradação em solo simulado.....	153
Figura 58: Custo total de cada alternativa analisada.....	154
Figura 59: Impressão Ambiental da Análise de Ecoeficiência.....	157
Figura 60: Matriz de Ecoeficiência das amostras analisadas.....	159
Figura 61: Fatores de Relevância da Análise de Ecoeficiência.....	160
Figura 62: Impactos apresentados na categoria de impacto ambiental Demanda Acumulada de Energia.....	161

Figura 63: Impactos apresentados na categoria de impacto ambiental Consumo de Recursos Abióticos.....	164
.....	
Figura 64: Impactos apresentados na categoria de Resíduos Sólidos.....	167
Figura 65: Impactos apresentados na categoria de Uso da Terra.....	169
Figura 66: Impactos apresentados na categoria de Doenças e Acidentes Ocupacionais.....	171
Figura 67: Matriz de Ecoeficiência do cenário estabelecido.....	174

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Algumas formas de degradação e seus agentes promotores .....	57
Tabela 2: Principais normas para avaliar o crescimento de colônias .....	59
Tabela 3: Principais normas para avaliar a emissão de CO <sub>2</sub> .....	60
Tabela 4: Principais normas para avaliar a biodegradabilidade pela perda de massa em compostagem ou solo simulado .....	61
Tabela 5: Principais polímeros biodegradáveis comercialmente disponíveis .....	63
Tabela 6: Exemplos de relações da atividade humana/ aspecto ambiental/ impacto ambiental .....	72
Tabela 7: Alguns fatores de criticidade calculados para alguns recursos .....	83
Tabela 8: Fatores de equivalência para Resíduos Sólidos .....	84
Tabela 9: Valores limites para Efluentes .....	85
Tabela 10: Algumas informações do material “E” .....	94
Tabela 11: Algumas informações do PBAT .....	94
Tabela 12: Informações técnicas do fabricante sobre o CaCO <sub>3</sub> .....	95
Tabela 13: Composições dos filmes poliméricos biodegradáveis preparados que foram estudados nessa dissertação .....	95
Tabela 14: Amostras preparadas e caracterizadas nessa dissertação .....	96
Tabela 15: Intervalos de tempo para o ensaio de sorção.....	102
Tabela 16: Considerações estabelecidas para a determinação da Unidade Funcional (UF) do estudo .....	108
Tabela 17: Matérias-primas necessárias para cada sacola manufaturada .....	111
Tabela 18: Preço final da unidade da sacola em R\$ .....	113
Tabela 19: Quantidade necessária de CaCO <sub>3</sub> por amostra, em kg/UF .....	114
Tabela 20: Quantidade de sacolas descartáveis e de resíduos sólidos orgânicos por Unidade Funcional encaminhados à destinação final .....	117
Tabela 21: Quantidade de turfa gerada por sacola manufaturada com polímeros biodegradáveis .....	118
Tabela 22: Receita total proveniente da venda da turfa obtida por amostra .....	118
Tabela 23: Temperatura na qual ocorre a máxima degradação.....	133

Tabela 24: Parâmetros analisados no solo simulado no início do ensaio de biodegradação.....	145
Tabela 25: Fotomicrografias das amostras iniciais, após 180 dias e após 360 dias do ensaio de biodegradação em solo simulado .....	152
Tabela 26: Preço da unidade (R\$) de cada sacola analisada .....	155
Tabela 27: Custo total para cada amostra analisada .....	156
Tabela 28: Custo total de transporte para cada amostra analisada .....	156
Tabela 29: Demanda Acumulada de Energia para a produção de papel kraft em MJ/UF .....	162
Tabela 30: Demanda Acumulada de Energia para a produção de polietileno de alta densidade em MJ/UF .....	162
Tabela 31: Demanda Acumulada de Energia na fase de produção das sacolas manufaturadas com os filmes polímeros desenvolvidos em MJ/UF .....	163
Tabela 32: Demanda Acumulada de Energia para a produção de CaCO <sub>3</sub> em MJ/UF .....	163
Tabela 33: Demanda Acumulada de Energia na fase de compostagem das sacolas maufaturadas com os filmes poliméricos desenvolvidos em MJ/UF .....	163
Tabela 34: Consumo de Recursos Abióticos da amostra S <sub>KRAFT</sub> em kg/UF .....	165
Tabela 35: Consumo de Recursos Abióticos da amostra S <sub>PEAD</sub> em kg/UF .....	166
Tabela 36: Consumo de gás natural e petróleo na fase de produção das sacolas manufaturadas com os filmes poliméricos desenvolvidos em kg/UF .....	166
Tabela 37: Resíduos Sólidos na fase de produção da amostra S <sub>PEAD</sub> em kg/UF ....	168
Tabela 38: Resíduos Sólidos na fase de produção da amostra S <sub>KRAFT</sub> em kg/UF ...	168
Tabela 39: Resíduos Sólidos na produção do CaCO <sub>3</sub> em kg/UF .....	169
Tabela 40: Uso da Terra da amostra S <sub>KRAFT</sub> em m <sup>2</sup> /UF .....	170
Tabela 41: Doenças e Acidentes Ocupacionais na fase de produção dos polímeros biodegradáveis por amostra em ocorrências/UF .....	172
Tabela 42: Doenças e Acidentes Ocupacionais na fase de manufatura da amostra S <sub>KRAFT</sub> em ocorrências/UF .....	172
Tabela 43: Preço da unidade da sacola atualmente e considerando o cenário .....	173

## LISTA DE SIGLAS

ABIPLAST - Associação Brasileira da Indústria do Plástico

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas

ABRELPE - Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais

ACV - Avaliação do Ciclo de Vida

ASTM - *American Standard for Testing and Methods*

BASF - *Badische Anilin und Soda Fabrik*

BASF SE. - *Badische Anilin und Soda Fabrik - Societas Europaea*

CEBDS - Conselho Empresarial Brasileiro para o Desenvolvimento Sustentável

CNAE – Classificação Nacional de Atividades Econômicas

DBO – Demanda Bioquímica de Oxigênio

DQO – Demanda Química de Oxigênio

EMBRAPA – Pesquisa Brasileira de Pesquisa Agropecuária

FISPQ – Ficha de Informação de Segurança de Produtos Químicos

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

IPEN – Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares

IPCC – *Intergovernmental Panel on Climate Change*

ISIC - *International Standard Industrial Classification of All Economic Activities*

ISO - *International Standardization Organization*

MMA - Ministério do Meio Ambiente

MSDS – *Material Safety Data Sheet*

NSF - National Sanitation Foundation

ONU - Organização das Nações Unidas

PA - Poliamida

PBAT - poli (butileno adipato cotereftalato)

PCL - policaprolactona

PE - polietileno

PEAD - polietileno de alta densidade

PEBD - polietileno de baixa densidade

PET - polietileno tereftalato

PHB - polihidroxibutirato

PHBV - poly (3-hydroxybutyrate-co-3-hydroxyvalerate)

PLA - poli (ácido láctico)

PNRS - Política Nacional de Resíduos Sólidos

PP - polipropileno

PPCS - Plano de Ação para a Produção e Consumo Sustentáveis

PS - poliestireno

PVC - cloreto de polivinila

RSU - Resíduo Sólido Urbano

TGA – Análise Termogravimétrica

UF - Unidade Funcional

UNEP – United Nations Environment Programme

WBCSD - *World Business Council for Sustainable Development*

WCED - *World Commission on Environment and Development*

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO.....</b>	<b>45</b>
<b>2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>49</b>
2.1 Resíduo Sólido Urbano (RSU) .....	49
2.2 Sacolas Descartáveis.....	50
2.3 Sacolas oxi-biodegradáveis .....	51
2.4 Materiais poliméricos e o meio ambiente .....	52
2.4.1 Aterro Sanitário .....	54
2.4.2 Reciclagem .....	55
2.4.3 Compostagem .....	56
2.4.4 Degradação de polímeros .....	56
2.4.5 Biodegradação .....	58
2.4.5.1 Avaliação do crescimento da colônia de micro-organismos .....	59
2.4.5.2 Medição da liberação de CO <sub>2</sub> .....	59
2.4.5.3 Compostagem ou solo simulado .....	60
2.5 Polímeros biodegradáveis.....	62
2.5.1 Poli (butileno adipato cotereftalato) PBAT .....	64
2.5.2 Poli (ácido láctico) PLA.....	65
2.6 Blendas poliméricas .....	66
2.6.1 Blendas poliméricas de PBAT com PLA .....	66
2.6.2 Compósitos poliméricos .....	68
2.6.3 Cargas minerais .....	68
2.7 Produção e consumo sustentáveis .....	69
2.8 Avaliação do Ciclo de Vida (ACV).....	71
2.8.1 Impactos ambientais e aspectos ambientais .....	71
2.8.2 Contextualização de ACV .....	72
2.8.3 Processo de condução de um estudo de ACV .....	76
2.8.3.1 Definição de Objetivo e Escopo.....	76
2.8.3.2 Análise de Inventário .....	77
2.8.3.3 Avaliação de Impacto .....	78
2.8.3.4 Interpretação dos resultados .....	78
2.9 Ecoeficiência .....	78
2.10 Análise de Ecoeficiência .....	79

2.11	Categorias de Impacto Ambiental da Análise de Ecoeficiência .....	82
2.11.1	Demanda Acumulada de Energia .....	82
2.11.2	Consumo de Recursos Abióticos .....	82
2.11.3	Emissões .....	84
2.11.3.1	Resíduos Sólidos.....	84
2.11.3.2	Efluentes.....	84
2.11.3.3	Emissões Atmosféricas .....	86
2.11.4	Uso da Terra.....	87
2.11.5	Água Consuntiva .....	87
2.11.6	Doenças e Acidentes Ocupacionais .....	87
2.11.7	Potencial de Toxicidade Humana .....	88
2.12	Impactos Econômicos na Análise de Ecoeficiência .....	88
2.13	Fator de Relevância Ponderado (ambiental e social).....	88
2.13.1	Fator de Relevância Ambiental.....	89
2.13.2	Fator de Relevância Social .....	89
<b>3.</b>	<b>OBJETIVOS .....</b>	<b>91</b>
3.1	Objetivo geral.....	91
3.2	Objetivos específicos .....	91
<b>4.</b>	<b>METODOLOGIA.....</b>	<b>93</b>
4.1	Materiais .....	94
4.2	Preparação das misturas poliméricas .....	95
4.3	Desenvolvimento dos filmes poliméricos .....	96
4.4	Corpos-de-prova .....	98
4.5	Ensaio mecânicos .....	99
4.6	Análise Termogravimétrica (TGA).....	100
4.7	Ângulo de contato .....	100
4.8	Ensaio de sorção .....	101
4.9	Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) .....	102
4.10	Avaliação da biodegradação em solo simulado .....	102
4.11	Análise do solo simulado .....	104
4.11.1	Determinação do pH.....	105
4.11.2	Determinação do teor de umidade.....	105
4.11.3	Determinação do teor de matéria orgânica.....	105
4.11.4	Determinação do percentual de carbono total .....	106

4.11.5	Determinação do percentual de nitrogênio total .....	106
4.11.6	Relação C/N .....	107
4.12	Microscopia óptica .....	107
4.13	Análise de Ecoeficiência .....	107
4.13.1	Objetivo .....	108
4.13.2	Função e Unidade Funcional.....	108
4.13.3	Fronteiras do estudo.....	108
4.13.4	Abordagem .....	109
4.13.5	Fluxograma do Sistema de Produto .....	109
4.14	Fases do processo na condução da Análise de Ecoeficiência.....	110
4.14.1	Fase de Produção .....	111
4.14.1.1	Papel kraft .....	111
4.14.1.2	Polietileno de Alta Densidade (PEAD).....	112
4.14.1.3	Polímeros biodegradáveis .....	113
4.14.1.4	Carbonato de Cálcio (CaCO <sub>3</sub> ) .....	113
4.14.2	Fase de Manufatura.....	114
4.14.2.1	Manufatura da sacola de papel kraft .....	115
4.14.2.2	Manufatura da sacola de PEAD .....	115
4.14.2.3	Manufatura das sacolas com polímeros biodegradáveis.....	115
4.14.3	Fase de Acondicionamento no supermercado .....	115
4.14.4	Fase de Descarte na Residência.....	116
4.14.5	Fase de Destinação Final .....	116
4.14.5.1	Compostagem .....	117
4.14.5.2	Aterro Sanitário.....	119
4.14.6	Transportes.....	120
4.15	Premissas .....	121
<b>5.</b>	<b>RESULTADOS .....</b>	<b>123</b>
5.1	Ensaio mecânico de tração.....	123
5.1.1	Alongamento na ruptura .....	123
5.1.2	Resistência máxima à tração .....	124
5.1.3	Módulo de Young .....	126
5.1.4	Curvas de tensão <i>versus</i> deformação .....	127
5.2	Análise Termogravimétrica (TGA).....	129
5.3	Ângulo de contato .....	135

5.4 Ensaio de sorção .....	138
5.5 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) .....	139
5.6 Avaliação da biodegradação .....	144
5.6.1 Análise do solo.....	144
5.6.2 Variação de massa .....	146
5.6.3 Microscopia óptica .....	151
5.7 Análise de Ecoeficiência .....	154
5.7.1 Impactos Econômicos.....	154
5.7.2 Impactos Ambientais .....	157
5.7.3 Matriz de Ecoeficiência.....	158
5.7.4 Fator de Relevância.....	160
5.7.5 Demanda Acumulada de Energia .....	161
5.7.6 Consumo de Recursos Abióticos.....	164
5.7.7 Resíduos Sólidos.....	167
5.7.8 Uso da Terra.....	169
5.7.9 Doenças e Acidentes Ocupacionais .....	171
5.8 Cenário da Análise de Ecoeficiência.....	172
<b>6. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>	<b>177</b>
<b>7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>181</b>
<b>ANEXOS .....</b>	<b>201</b>

## 1. INTRODUÇÃO

Ao longo do tempo recente, pudemos acompanhar a intensificação do uso dos plásticos e a evolução de suas aplicações, que trouxeram maior comodidade para a sociedade. Dentre as vantagens apresentadas pelos plásticos, destacam-se o baixo custo, a leveza, a capacidade de suportar peso, o fácil processamento e a flexibilidade (SANTOS; DUARTE, 2015; ABIPLAST, 2015; BRINE; THOMPSON, 2010). Cerca de 40% da produção dos plásticos é destinada à fabricação de utensílios descartáveis e embalagens, como por exemplo, as sacolas descartáveis, usualmente denominadas sacolas plásticas (ABRELPE, 2015; SIRACUSA et al., 2008).

Na década de 70 se observou a inclusão e o aumento na utilização das sacolas plásticas no mundo, as quais substituíram as embalagens de papel, que eram frequentemente utilizadas nos supermercados (SANTOS et al., 2012). Porém, os impactos ambientais decorrentes da sua inadequada destinação final, relacionados com a vida útil longa e a baixa degradabilidade, têm sido alvos de preocupação da sociedade atual (MONTAGNA, 2014; ADAMCOVA, 2014).

De acordo com informações divulgadas pelo Instituto AKATU (2011), o consumo mundial de recursos naturais é de mais de 50% superior ao que o planeta é capaz de repor e absorver. A mudança nos padrões de produção e consumo, por ser muito complexa e abrangente, é focalizada em diversos aspectos apresentados na Agenda 21 (1992), em especial nos capítulos dedicados aos instrumentos econômicos e à transferência de tecnologia. Assim, é possível enfatizar que produção e consumo de forma consciente são essenciais para diminuir os impactos sobre a natureza e garantir a vida no planeta.

A ciência, a tecnologia e o crescimento econômico ocasionaram grandes benefícios para a sociedade. Porém, após o acelerado crescimento populacional e o comportamento de consumo inconsciente, uma sucessão de efeitos colaterais foi provocada no meio ambiente. Entre esses efeitos, podemos destacar a poluição do ar, do solo e das águas.

Nos últimos anos, em todo o mundo, tem sido reconhecida a necessidade de reduzir a quantidade de sacolas plásticas descartadas inadequadamente no meio ambiente, visto que essas têm provocado sérios problemas, devido à alta descartabilidade, baixa reciclagem e alta durabilidade, provocando assim aglomerados em aterros e mares (SANTOS; DUARTE, 2015).

Segundo Santos et al. (2012), a melhor solução para os impactos decorrentes das sacolas plásticas é o consumo sustentável das mesmas, por outro lado, a reciclagem mecânica se apresenta como a segunda solução e melhor destinação destas, uma vez que elas são 100% recicláveis. Contudo, segundo dados de 2013 divulgados no Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil, o índice praticado de reciclagem no mundo é ainda muito baixo, e aproximadamente 80% dos plásticos não são reciclados, acumulando-se nos “depósitos” de resíduos sólidos urbanos (ABRELPE, 2015; TOUGH, 2007).

Em busca de uma solução parcial para o descarte das sacolas plásticas, tem crescido nos últimos anos o interesse em incrementar e desenvolver materiais biodegradáveis, com características que permitam a sua utilização em embalagens e utensílios descartáveis (RIEGER et al., 2010; KHOO; TAN; CHNG, 2010).

As sacolas plásticas produzidas com polímeros biodegradáveis tornaram-se uma alternativa, pois são adequadas para a compostagem (processo de deterioração dos resíduos, transformando-os em fertilizante orgânico) e estão em conjunto com a necessidade da sociedade, no descarte adequado dos resíduos orgânicos (MOHEE; UNMAR, 2007; DAVIS; SONG, 2006). Especificamente no Brasil, a compostagem conjunta entre sacolas compostáveis e resíduos sólidos orgânicos poderia ser viável, já que cerca de 51% dos resíduos gerados são de matérias orgânicas e têm sido dispostos em aterros e não submetidos aos processos de biodegradação apropriados, gerando impactos negativos, tais como: emissão de metano, produção de chorume e proliferação de doenças (ABRELPE, 2015; LINO; ISMAIL, 2011).

Diante desse cenário, compósitos poliméricos com matrizes biodegradáveis vêm sendo desenvolvidos cada vez mais, pois apresentam alternativas para melhorar as propriedades mecânicas da matriz polimérica e reduzir custos, originando materiais competitivos para utilização na indústria.

Existem diversos tipos de polímeros biodegradáveis comercialmente disponíveis. Dentre eles, os trabalhos utilizando como matriz a mistura dos polímeros poli(butileno adipato tereftalato) – PBAT e poli(ácido lático) - PLA são comumente utilizados na produção de filmes em todo o mundo. A mistura de PBAT, um polímero de origem fóssil, flexível e resistente, com PLA um biopolímero rígido e frágil proveniente de fontes renováveis, vem demonstrando propriedades interessantes para a substituição dos polímeros convencionais (WOJTCZAK et al., 2014; MORITA et al., 2012).

Contudo, antes dos polímeros biodegradáveis substituírem os convencionais, esses precisam superar suas desvantagens relacionadas ao alto custo de produção em comparação aos plásticos convencionais (PELLICANO; PACHEKOSKI; AGNELLI, 2009).

Deste modo, para o desenvolvimento de alguns compósitos poliméricos, cargas são adicionadas nas formulações, com o objetivo de reduzir custos e eventualmente melhorar as propriedades do material. Dentre as cargas minerais possíveis de utilização, podemos citar o Carbonato de Cálcio ( $\text{CaCO}_3$ ) (SHI; DOU, 2014; GARAY, 2010; PELLICANO; PACHEKOSKI; AGNELLI, 2009).

O conceito de desenvolvimento sustentável surgiu do questionamento sobre até quando existiriam recursos naturais disponíveis para sustentar o crescimento populacional (SANTOS et al., 2012). Globalmente, a discussão sobre sustentabilidade implica cada vez mais na reflexão sobre mudanças nos modelos de produção e consumo (AKATU, 2011). Em virtude da preocupação com os impactos decorrentes desses atuais padrões de produção e consumo, diagnosticar, medir e gerenciar a sustentabilidade é algo que vem sendo discutido nos últimos anos.

Segundo Jabbour (2010), algumas metodologias de mensuração e controle ambiental possuem como objetivo não focar somente na redução dos impactos ambientais, mas sim no entendimento das melhores alternativas para minimizar os impactos e melhorar a qualidade de vida da população.

Dentre as metodologias referenciadas na literatura que vêm proporcionando contribuições importantes, podemos citar a Avaliação do Ciclo de Vida (ACV), que enfoca os aspectos ambientais e potenciais impactos deles decorrentes, ao longo de todo o ciclo de vida de um produto, e a Análise de Ecoeficiência, que avalia e compara o ciclo de vida de produtos ou processos, através da identificação e quantificação de aspectos causadores de impactos ambientais em conjunto com a determinação de todos os impactos econômicos envolvidos desde a extração dos recursos até sua disposição final, analisando assim todo o valor agregado na cadeia produtiva (JACQUEMIN; PONTALIER; SABLAYROLLES, 2012; MATILLA et al., 2011).

Na literatura, a metodologia de ACV vem trazendo altas contribuições para área de polímeros. No Brasil, essa avaliação já é presente há mais de uma década (QUEIROZ e GARCIA, 2011).

Levando em consideração o interesse público em obter uma alternativa para a destinação das sacolas descartáveis, da crescente quantidade de plásticos que tem

vido descartada de forma inadequada no meio ambiente, do alto custo para a produção de polímeros biodegradáveis e do objetivo expresso na Lei Federal nº 12.305/2010, para destinação final ambientalmente adequada dos resíduos sólidos, o presente trabalho visou desenvolver e caracterizar filmes poliméricos biodegradáveis, com baixo custo de produção, para aplicação em sacolas descartáveis de supermercado e realizar a sua Análise de Ecoeficiência em comparação com sacolas utilizadas atualmente (sacola plástica convencional e sacola de papel).

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Serão apresentados alguns aspectos teóricos e uma pequena revisão da literatura, buscando subsidiar uma maior compreensão no tema abordado.

### 2.1 Resíduo Sólido Urbano (RSU)

Os resíduos sólidos urbanos englobam os descartes domiciliares, aqueles originários de atividades domésticas em residências urbanas e os resíduos resultantes de limpeza urbana. Esses são caracterizados de acordo com os impactos negativos que podem causar para o ser humano e o meio ambiente, quando descartados de forma inadequada e sem tratamento (LINO; ISMALL, 2011).

Existe uma relação direta entre a destinação dos resíduos sólidos e os problemas ambientais, onde é possível destacar a poluição dos compartimentos ambientais (solo, ar e água), com consequentes interferências à saúde humana. Em relação a esses problemas, o gerenciamento de resíduos sólidos se tornou prioridade nas políticas públicas ambientais no Brasil e no mundo (PEDROSA; NISHIWAKI, 2014).

Segundo o Panorama de Resíduos Sólidos Urbanos no Brasil (2015), um habitante do Estado de São Paulo gera 1,400 kg de RSU, totalizando aproximadamente 62 mil toneladas por dia no Estado.

Da geração de Resíduos Sólidos Urbanos no Brasil em 2015, 58,7% seguiram para aterros sanitários em 2014, enquanto os 41,3% restantes, que correspondem a mais de 82 mil toneladas diárias, foram encaminhadas inadequadamente para lixões (34 mil toneladas) e aterros controlados (48 mil toneladas), carecendo de sistemas necessários para proteção do meio ambiente (ABRELPE, 2015).

Um dos compromissos da Agenda 21 (1992) aborda o manejo ambientalmente benéfico dos resíduos, que deve ir além do simples depósito ou aproveitamento por métodos seguros dos resíduos gerados, e sim buscar resolver a causa fundamental do problema, ou seja, procurar mudar os padrões não sustentáveis de produção e consumo.

No Brasil, entrou em vigor a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), instituída pela Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010 (BRASIL, 2010), com vistas à gestão integrada e gerenciamento dos resíduos sólidos. Dentre os objetivos

estipulados nessa Política, destaca-se a não geração, a redução, a reutilização, a reciclagem, o tratamento, bem como a disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos.

A PNRS também reconhece a importância das atividades dos catadores e das cooperativas de catadores para todo o sistema de gestão de resíduos sólidos no país (RUTKOWSKI; RUTKOWSKI, 2015).

## 2.2 Sacolas descartáveis

Em todo o mundo, são distribuídas entre 500 bilhões a 1 trilhão de sacolas descartáveis por ano, sendo que a maioria é produzida com polímeros *commodities*, isto é, materiais fabricados em alta escala e com custo reduzido (MMA, 2016).

De acordo com a campanha “Saco é um Saco” do Ministério do Meio Ambiente (2016), cada brasileiro consome em média 66 sacolas por mês. Só na cidade de São Paulo, em 2011, aproximadamente 1,5 bilhão delas foram distribuídas (JUNIOR et al., 2014). Uma grande quantidade dessas sacolas descartáveis é fornecida pelo comércio e após seu uso, ao invés de recicladas, são encaminhadas para os aterros da cidade (SANTOS; DUARTE, 2015; OLIVATO et al., 2013).

Os plásticos utilizados para a fabricação das sacolas de supermercado são originalmente obtidos a partir do petróleo, como o Polietileno de Alta Densidade (PEAD), Polietileno de Baixa Densidade (PEBD), Polipropileno (PP) e Poliestireno (PS) (NOVACK; FINZI-QUINTÃO, 2015). Essas variações permitem ressaltar aspectos desejados nas sacolas, tais como o maior ou menor brilho, resistência à tração, tato, facilidade de abertura, dentre outras características (VIANA, 2010).

A decomposição das sacolas plásticas pode demorar até 50 anos em ambiente úmido e por mais de 100 anos em ambientes secos. Outras fontes afirmam que a degradação pode demorar um período de 40 a 200 anos (GUIMARÃES; NOHARA; SOUZA, 2012).

Com a conscientização da sociedade sobre os impactos ambientais causados pelo descarte das sacolas plásticas, algumas regiões no mundo têm implementado planos de ação e buscado soluções inovadoras para reduzir os resíduos gerados pelas sacolas plásticas e os impactos a eles associados. Dentre as principais medidas tomadas está a obrigatoriedade do uso de sacolas biodegradáveis e/ou compostáveis (OLIVATO et al., 2013; TOUGH, 2007).

Resultados decorrentes de uma pesquisa de opinião realizada na cidade de São Paulo, mostraram que 94% da população reutiliza as sacolas plásticas dos supermercados como sacos para acondicionamento de resíduos (PLASTIVIDA, 2012; LAVAGNOLO, 2010). Assim, se as sacolas biodegradáveis fossem acopladas aos resíduos sólidos orgânicos quando destinadas, existiria uma redução dos resíduos em aterros e uma melhora na qualidade do solo, promovida pela geração de composto orgânico (BASTIOLI, 2014).

### **2.3 Sacolas oxi-biodegradáveis**

No Brasil, algumas sacolas identificadas como oxi-biodegradáveis são distribuídos nos supermercados e estabelecimentos comerciais, gerando discussões a respeito da segurança e da capacidade de biodegradação desses materiais (BOSCARO, 2014).

Os plásticos oxi-biodegradáveis, também denominados de OBP's, são plásticos convencionais aos quais foram incorporados aditivos químicos à base de compostos de metais de transição tais como ferro (Fe), níquel (Ni), manganês (Mn) ou cobalto (Co), que por meio de luz ultravioleta, calor, umidade, acelera a sua decomposição, através de processos oxidativos, em fragmentos menores. Estes fragmentos ao atingirem a massa molecular adequada, podem ser umedecidos por água e serem utilizados como nutrientes para os micro-organismos, como fungos e bactérias (SANTOS et. al, 2012; DE PAOLI, 2008).

O termo oxi-biodegradável se aplica aos plásticos que, devido à sua composição, sofrem mais rapidamente degradação oxidativa que outros plásticos convencionais. Embora o plástico seja inicialmente bionerte, os produtos da oxidação são biodegradáveis (WILES, 2005). No entanto, existe muita contestação com relação à biodegradabilidade das sacolas oxi-biodegradáveis comercializadas, pois pesquisadores afirmam que essas ao se degradarem, não desaparecem no meio ambiente, sofrendo apenas fragmentação, o que pode causar grandes impactos ambientais (BRITO et al, 2011). Há ainda suspeitas de que os aditivos utilizados possam ser nocivos ao meio ambiente, visto que contêm metais de transição em sua composição (MAZUR , 2009).

## 2.4 Materiais poliméricos e o meio ambiente

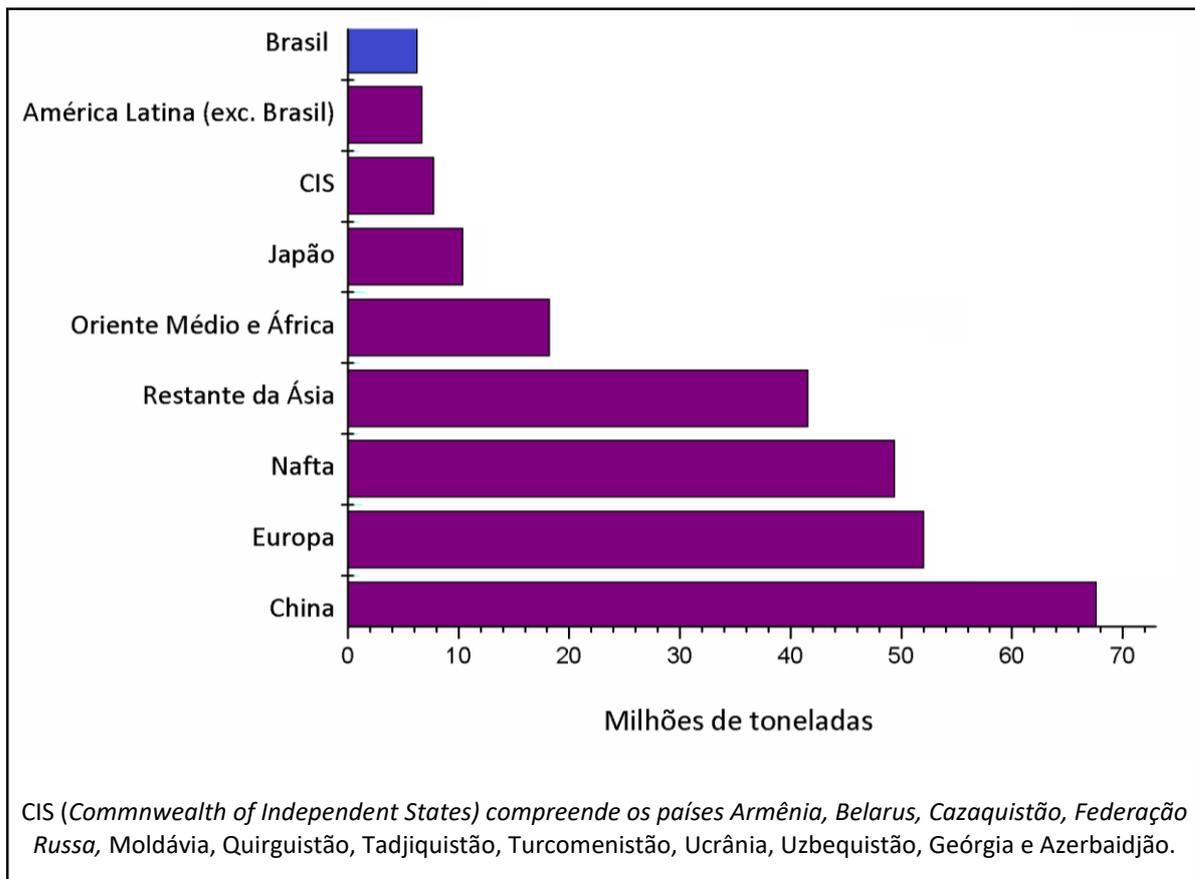
Um monômero é uma molécula orgânica capaz de se combinar quimicamente com outras moléculas, similares ou não, para formar um material de elevada massa molar, conhecido como polímero (NEVILLE; BROOKS, 2013).

Há mais de meio século, os polímeros vêm substituindo gradualmente os materiais convencionais, como por exemplo o vidro, em quase todos os setores da economia, não só pelo seu baixo custo, mas também em consequência do desenvolvimento contínuo de sua funcionalidade (JURAS, 2013).

Os polímeros podem ser classificados em dois grandes grupos, de acordo com seu comportamento termo físico: os termoplásticos e os termofixos (PARENTE, 2006). Termoplásticos possuem longas cadeias, lineares e paralelas, sem ligações cruzadas e permitem reversibilidade com mudanças de temperatura. Exemplos desses materiais: Polietileno (PE), Cloreto de Polivinila (PVC), Poliestireno (PS), Poliamida (PA) e Polipropileno (PP). Os termofixos ou termorrígidos, devido ao seu processo de fabricação e moldagem, são materiais que amolecem ao serem aquecidos, porém sofrem transformação química que não permite reversibilidade na sua fusibilidade, após resfriado. Quando aquecidos, esses materiais queimam e degradam. São exemplos: formaldeídos, resinas epóxicas e alguns poliésteres.

Estima-se que no ano de 2015, a produção total de resinas termoplásticas foi de aproximadamente 260 milhões de toneladas no mundo inteiro, conforme ilustrado na Figura 1.

**Figura 1: Dados da produção mundial de resinas termoplásticas em 2013**

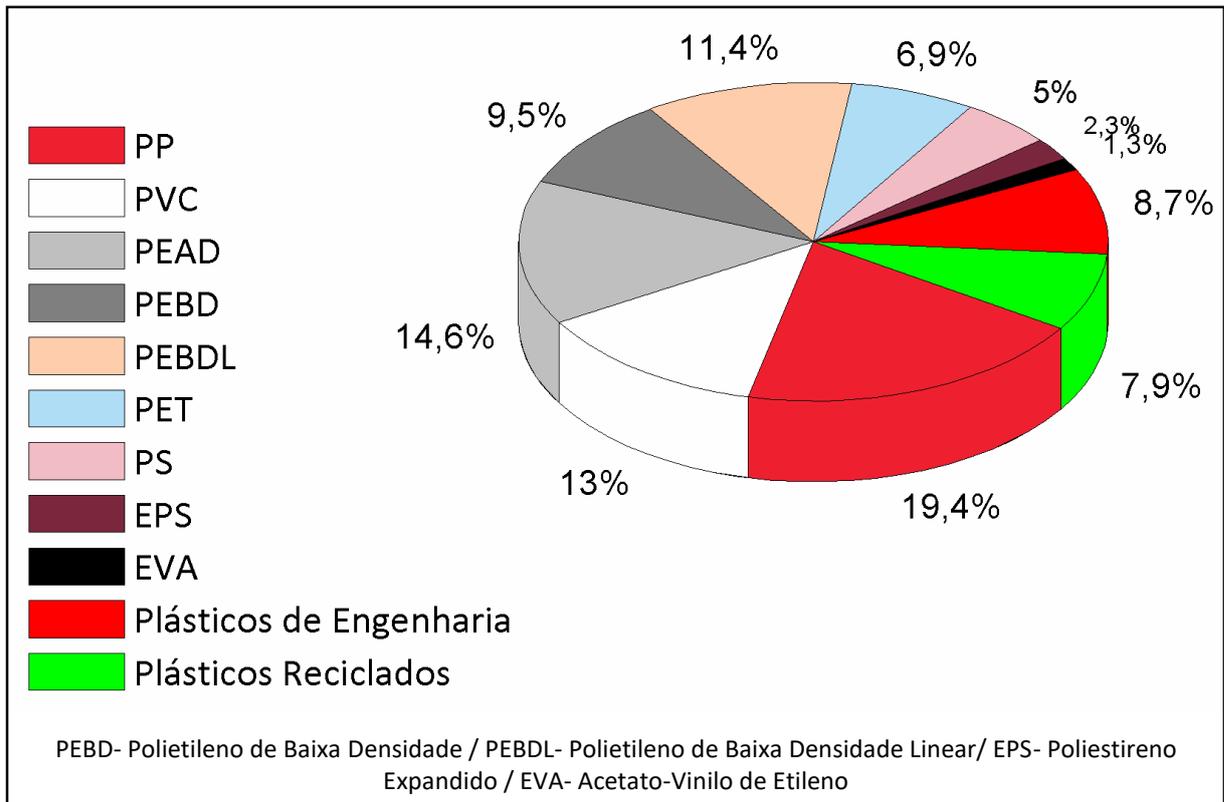


Fonte: Adaptado de ABIPLAST, 2015

A China responde por 26% de toda a produção mundial de resinas termoplásticas. Tal liderança é seguida pela Europa (União Europeia, Suíça e Noruega) e pelo bloco econômico NAFTA (composto por EUA, Canadá e México), que representam 20% e 19%, respectivamente. A participação brasileira, de 6,3 milhões de toneladas, é a mais significativa da América Latina, concentrando-se em PE, PP, PVC, Polietileno Tereftalato (PET) e “resinas de engenharia” (ABIPLAST, 2015).

Dentre os plásticos utilizados no Brasil em 2015, destacam-se os polietilenos, os polipropilenos e o PET, conforme apresentado na Figura 2. A demanda por esses plásticos se dá principalmente por conta das altas aplicações em embalagens e produtos descartáveis.

**Figura 2: Utilização dos plásticos no Brasil em 2015**



Fonte: Adaptado de ABIPLAST, 2015

A Política Nacional de Resíduos Sólidos trata, dentre outros objetivos estipulados, dos resíduos plásticos, estabelecendo estratégias para o desenvolvimento sustentável, incentivando a disposição final dos resíduos plásticos em ambientes mais favoráveis ao meio ambiente e a preservação dos recursos (OLIVEIRA, 2012). Dentre as soluções ambientalmente propostas para o gerenciamento desses resíduos plásticos, podemos destacar o aterro sanitário, a reciclagem, a compostagem e a degradação dos polímeros.

#### 2.4.1 Aterro Sanitário

Aterros sanitários constituem locais destinados à destinação final de resíduos sólidos gerados pela ação humana. Nele são dispostos resíduos domésticos, comerciais e industriais, da construção civil, serviços de saúde e serviços de saneamento (estações de tratamento de água e de esgoto sanitário) (ABRELPE,

2015). No Brasil, o aterro sanitário é a técnica mais comum de disposição final de resíduos sólidos urbanos (LEJA; LEWANDOWICZ, 2009).

A maior desvantagem associada aos aterros sanitários está relacionada à grande demanda de área. Além disso, a matéria orgânica mineralizada é mantida no sistema, não sendo possível, portanto, sua reciclagem (ROSA et al., 2016). O sistema também apresenta desvantagens relacionadas ao controle dos gases gerados. Segundo Silva; Freitas; Candiani (2013), uma parte do gás gerado no aterro sanitário atravessa o sistema de cobertura dos resíduos (camada de solo) e escapa para a atmosfera, mesmo quando o aterro apresenta um sistema de drenagem de gases para coleta do biogás. Esses sistemas não são capazes de captar com eficiência (captação de 40 a 60%) e parcelas significativas de metano são emitidas ao meio ambiente.

#### **2.4.2 Reciclagem**

A reciclagem consiste na transformação dos resíduos plásticos mediante a separação, moagem e fusão do polímero, seguida de moldagem do mesmo (ROSA et al., 2016). No Brasil, a reciclagem mecânica retrata a principal forma de reciclagem dos plásticos, onde os materiais plásticos descartados pós-consumo são convertidos em grânulos capazes de serem utilizados na produção de novos artefatos plásticos (ABRELPE, 2015).

Estudos de Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) demonstraram que a reciclagem pode reduzir expressivos impactos ambientais decorrentes das embalagens plásticas (COLTRO; DUARTE, 2013). Porém, o percentual apresentado entre o volume gerado e a recuperação do plástico pós-consumo ainda é muito baixo no Brasil. Segundo o Panorama de Resíduos Sólidos (2013), da geração de 3,26 milhões de toneladas de resíduos plásticos no ano de 2012, somente cerca de 683 mil toneladas foram recicladas, o que corresponde cerca de 21% do total.

As principais dificuldades do mercado do plástico reciclado são: (a) a ausência de comprometimento entre a demanda e o fornecimento das matérias-primas; (b) o baixo custo das resinas virgens; (c) a alta contaminação dos resíduos e; (d) a alta carga tributária que incide sobre a matéria-prima reciclada, onde o imposto sobre os produtos industrializados reciclados (12%) é superior aos cobrados sobre a resina virgem (10%) (ROMÃO; SPINACÉ; DE PAOLI, 2009; SANTOS; AGNELLI; MANRICH,

2004). Esses fatores, na maioria, são responsáveis pela menor competitividade e qualidade final do plástico reciclado.

Por outro lado, as atividades de reciclagem são favorecidas em decorrência da necessidade de aumentar a renda familiar associada à viabilidade econômica e à questão da preservação ambiental (SANTOS; AGNELLI; MANRICH, 2004).

O Brasil, assim como outros países em desenvolvimento, reconhece que a maior parte da reciclagem em regiões urbanas é decorrente das atividades de reciclagem informais, onde a mão de obra é barata e a separação é feita principalmente de forma manual (RUTKOWSKI; RUTKOWSKI, 2015; SPINACÉ; DE PAOLI, 2005).

### **2.4.3 Compostagem**

A definição da compostagem está associada ao processo de decomposição aeróbia da matéria orgânica por organismos heterótrofos aeróbios. Em condições controladas, o material biodegradável (por exemplo, plásticos biodegradáveis) é convertido a gás carbônico, água e matéria orgânica estável, comumente denominado 'composto' ou 'humus' (SCOTON et al., 2016; ROSA et al., 2016).

Diante do elevado percentual de matéria orgânica presente nos Resíduos Sólidos Urbanos, o processo de compostagem, a fim de produzir um material com características semelhantes às de um fertilizante orgânico, pode apresentar um alto valor agregado, que servirá como alternativa de fonte de renda (GOMES et al., 2015).

A maior porcentagem dos resíduos sólidos urbanos gerados no Brasil é constituída de resíduos orgânicos, aproximadamente 51,4%. Contudo, estima-se que apenas 1,6% desses resíduos sejam aproveitados com o processo de compostagem (SIQUEIRA; ASSAD, 2015).

### **2.4.4 Degradação de polímeros**

A degradação pode ser entendida como qualquer alteração física ou química das propriedades dos polímeros, como consequência de alguns efeitos ambientais, como calor, luz, umidade, condições químicas ou de atividades biológicas (SHAH et al., 2008).

A degradação de polímeros vem apresentando relevância para diversas áreas, dentre as quais se destacam: ambiental, biomédica, agrícola, veterinária e industrial. Na área ambiental os estudos trazem, principalmente, propostas de alternativas para a mais rápida degradação na natureza e a reciclagem de materiais plásticos, como sacolas, garrafas e embalagens, e propostas para aplicação de polímeros biodegradáveis na remediação de áreas impactadas por derramamentos de petróleo (COSTA et al., 2015).

Todos os polímeros são degradáveis, embora o mecanismo de degradação possa variar. Para aumentar os índices de degradação no meio ambiente, várias propostas têm sido estudadas, entre as quais: (a) a incorporação de elementos na estrutura que promovam processos de fotodegradação; (b) o estudo de utilização de estruturas poliméricas (poliamidas, poliésteres, poliuretanos) que contenham estruturas hidrofílicas na sua composição, predispondo-as à degradação pela ação da umidade do ambiente; (c) o desenvolvimento de materiais mistos com outros polímeros que apresentem suscetibilidade natural para o ataque de microrganismos no ambiente (FORLIN; FARIA, 2002).

Na Tabela 1, é possível observar algumas formas de degradação e seus agentes promotores.

**Tabela 1: Algumas formas de degradação e seus agentes promotores**

<b>Tipo de Degradação</b>	<b>Agente</b>
Degradação fotoquímica	Luz (ultravioleta e visível)
Biodegradação	Micro-organismos
Degradação mecânica	Forças tensionais
Degradação química, hidrólise	Químico
Degradação térmica	Calor
Degradação termooxidativa	Calor e Oxigênio
Fotooxidação	Agentes oxidantes

Fonte: Adaptado de REZENDE, 2007

Dos tipos de degradação citados, destacaremos a degradação microbiológica ou biodegradação, que consiste na degradação dos materiais poliméricos por meio da ação de micro-organismos vivos.

### 2.4.5 Biodegradação

O processo de biodegradação requer a atuação de diferentes grupos de micro-organismos, sendo as bactérias o principal grupo. Parâmetros como umidade, temperatura, pH, salinidade e fonte de nutrientes são importantes fatores que devem ser considerados na biodegradação de polímeros (BASTIOLI, 2014; DE PAOLI, 2008; REZENDE, 2007). A biodegradação pode ocorrer tanto na presença como na ausência do oxigênio, biodegradação aeróbica e anaeróbica, respectivamente (BRITO et al., 2011).

De maneira geral, a biodegradação ocorre quando os polímeros são primeiramente convertidos a monômeros, e esses são mineralizados principalmente a dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) (processos aeróbicos) ou dióxido de carbono e metano (CH<sub>4</sub>) (processos anaeróbicos) (MOHEE et al., 2008). Esses processos são esquematizados nas Reações 1 e 2.

#### Biodegradação aeróbica:



#### Biodegradação anaeróbica:



Fonte: BASTIOLI, 2014.

Algumas instituições apresentam métodos de análise e avaliação da biodegradação. Dentre as principais entidades, destacam-se: (a) *American Society for Testing and Materials* (ASTM); (b) *International Standards Organization* (ISO); (c) *European Standardization Committee* (CEN) e; (d) *German Institute for Standardization* (DIN) (VACCIOLI, 2015).

As metodologias para avaliar a biodegradação de polímeros citadas na literatura, se baseiam, fundamentalmente, em monitorar o crescimento de micro-organismos em contato com os polímeros, a perda de massa dos polímeros, a liberação de CO<sub>2</sub> e mudanças nas propriedades dos polímeros (BASTIOLI, 2014).

### 2.4.5.1 Avaliação do crescimento da colônia de micro-organismos

Neste método, os micro-organismos potencialmente responsáveis pela degradação dos polímeros são isolados. Amostras dos polímeros são colocadas diretamente em contato com a solução contendo os micro-organismos, e a velocidade da biodegradação é avaliada pela velocidade de crescimento das colônias de micro-organismos em contato direto com o polímero (BRITO et al., 2011).

Na Tabela 2 é possível observar as duas principais normas que orientam a forma de condução desse método.

**Tabela 2: Principais normas para avaliar o crescimento de colônias**

<b>Norma</b>	<b>Nomenclatura</b>
ASTM G21-09	<i>Standard Practice for Determining Resistance of Synthetic Polymeric Materials to Fungi</i>
ASTM G22-76(1996)	<i>Standard Practice for Determining Resistance of Plastics to Bacteria</i>

Fonte: Elaborado pela autora, 2016

### 2.4.5.2 Medição da liberação de CO<sub>2</sub>

Neste método o polímero é colocado em solução ou solo compostado, ou seja adequado à biodegradação, e é medida a taxa de liberação de CO<sub>2</sub> em função do tempo, o que representará a velocidade da biodegradação do polímero (BRITO et al., 2011). São apresentadas na Tabela 3, algumas normas para avaliar a biodegradação pela emissão de CO<sub>2</sub>.

**Tabela 3: Principais normas para avaliar a emissão de CO<sub>2</sub>**

<b>Norma</b>	<b>Nomenclatura</b>
ISO 14852-1999	<i>Determination of the ultimate aerobic biodegradability of plastic materials in an aqueous medium – Method by analysis of evolved carbon dioxide</i>
ISO 14855-1-2012	<i>Determination of the ultimate aerobic biodegradability of plastic materials under controlled composting conditions – Method by analysis of evolved carbon dioxide – Part 1: General method</i>
ABNT NBR 14283:1999	Resíduos em solo – Determinação da biodegradação pelo método respirométrico
ASTM D5338-15	<i>Standard Test Method for Determining Aerobic Biodegradation of Plastic Materials Under Controlled Composting Conditions, Incorporating Thermophilic Temperatures</i>

Fonte: Elaborado pela autora, 2016

Rosa et al. (2002) monitoraram a produção de CO<sub>2</sub> na biodegradação aeróbica dos polímeros poli-β-(hidroxibutirato) (PHB), poli-β-(hidroxibutirato-co-valerato) (PHB-V) e poli-(ε-caprolactona) (PCL). Os resultados mostraram que o polímero PHB apresentou a maior biodegradação, enquanto que não foi percebida uma grande produção de CO<sub>2</sub> para o PHB-V. O PCL foi o polímero que apresentou uma biodegradação menos acentuada.

#### **2.4.5.3 Compostagem ou solo simulado**

Neste método o polímero é enterrado em um ambiente simulado, com condições controladas de temperatura, pH, umidade e disponibilidade de oxigênio. Em intervalos de tempo pré-determinados, amostras do polímero são retiradas e analisadas. Tais análises permitem detectar a evolução da biodegradação no tempo (BRITO et al., 2011).

A Tabela 4 apresenta as principais normas para avaliar a biodegradabilidade pela perda de massa em compostagem ou solo simulado.

**Tabela 4: Principais normas para avaliar a biodegradabilidade pela perda de massa em compostagem ou solo simulado**

<b>Norma</b>	<b>Nomenclatura</b>
ASTM G160-12	<i>Standard Practice for Evaluating Microbial Susceptibility of Nonmetallic Materials By Laboratory Soil Burial</i>
DIN 54900-1	<i>Testing of the compostability of polymeric materials</i>
ASTM D6868-11	<i>Standard Specification for Labeling of End Items that Incorporate Plastics and Polymers as Coatings or Additives with Paper and Other Substrates Designed to be Aerobically Composted in Municipal or Industrial Facilities</i>
ASTM D6400-12	<i>Standard Specification for Labeling of Plastics Designed to be Aerobically Composted in Municipal or Industrial Facilities</i>
ASTM D6002-96	<i>Standard Guide for Assessing the Compostability of Environmentally Degradable Plastics</i>
EN 13432	<i>Requirements for packaging recoverage through composting and biodegradation – Test scheme and evaluation criteria for the final acceptance of packaging</i>
ASTM D5988-12	<i>Standard Test Method for Determining Aerobic Biodegradation of Plastic Materials in Soil</i>

Fonte: Elaborado pela autora, 2016

Casarin et al. (2013) avaliaram a biodegradação dos polímeros PHB, EastarBio® e Ecoflex®, em solo composto simulado durante 30, 60 e 90 dias. Os resultados mostraram que o PHB foi o polímero que perdeu mais massa durante os 90 dias, um percentual de  $19,17 \pm 3,43$ . Também foi verificado que a biodegradação dos materiais estudados iniciou pela superfície e que, durante os 90 dias avaliados, não foi possível alterar a morfologia interna dos materiais.

Outra pesquisa teve como objetivo avaliar a biodegradação em solo simulado de blendas de poli( $\epsilon$ -caprolactona) (PCL) e acetato de celulose, desenvolvidas em diferentes proporções em massa. Foi verificado que quanto maior o teor de PCL na mistura, maior é a taxa de biodegradação (BARDI; ROSA, 2007).

## 2.5 Polímeros biodegradáveis

A durabilidade dos plásticos sintéticos é um grave problema ambiental quando estes materiais são usados em aplicações com pouca probabilidade de reciclagem, como é o caso das sacolas descartáveis. Esses são derivados do petróleo, ou seja, de fonte não renovável, implicando tempo de degradação de aproximadamente 100 anos (BASTIOLI, 2014; REDDY et al., 2013).

O aumento da conscientização sobre as questões ambientais relacionadas ao uso e descarte desses polímeros sintéticos, contribuiu para a necessidade de encontrar fontes alternativas para os produtos tradicionais em uso. Além disso, a regulamentação governamental está se tornando cada vez mais rigorosa (REDDY et al., 2013).

Nesse sentido, no interesse por tecnologias que mitiguem os impactos ambientais, a produção mundial de polímeros biodegradáveis tem aumentado nos últimos anos. Um ponto relevante destes materiais é a biodegradabilidade, sendo esta característica dependente da natureza química destes materiais e não de suas fontes (REDDY et al., 2013; QUEIROZ; GARCIA, 2011; RIEGER et al., 2010).

Segundo a *American Standard for Testing and Methods* (ASTM) D-883 (2012), polímeros biodegradáveis são polímeros onde a degradação é decorrente das ações dos micro-organismos, como bactérias, fungos e algas de ocorrência natural. Estes micro-organismos possuem enzimas que são capazes de hidrolisar os polímeros, quebrando algumas das ligações químicas da cadeia polimérica, sendo uma alternativa para os resíduos plásticos (FRANCHETTI; MARCONATO, 2006).

A biodegradação de um polímero vai depender de três fatores (FERREIRA, 2007):

- Presença de micro-organismos capazes de sintetizar enzimas específicas;
- Ambiente: condições ambientais, como temperatura, radiação solar, umidade, presença de oxigênio, entre outros, e;
- Fatores estruturais do polímero, como ligações químicas, hidrofobicidade, massa molar, entre outros.

Para um polímero biodegradável ser utilizado em determinada aplicação, ele deve degradar no meio onde terá sua destinação final e não necessariamente degradar em qualquer outro meio. Portanto, os polímeros biodegradáveis não devem

ser descartados na natureza ou aterros, pois necessitam de ambientes propícios para a sua degradação (VIEIRA, 2010).

Existem diversos tipos de polímeros biodegradáveis comercialmente disponíveis. A Tabela 5 apresenta os principais polímeros biodegradáveis comercializados.

**Tabela 5: Principais polímeros biodegradáveis comercialmente disponíveis**

<b>Matéria- prima: fonte</b>	<b>Poliéster</b>	<b>Nome comercial</b>	<b>Fabricante</b>
Agrícola	Ácido polilático (PLA)	Natureworks	Cargil - Dow LLC (USA)
		Lacty	Shimadzu (Japão)
		Lacea	Mitsui Chemicals (Japão)
		Heplon	Chronopol (EUA)
		CPLA	Dainippon Ink Chem. (Japão)
		PLA	Galactic (Bélgica)
	Polihidroxitiratos (PHB, PHBV)	Biocycle	PHB Industrial (Brasil)
Petróleo	Policaprolactona (PCL)	CAPA	Solvay (Bélgica)
		Tone	Union Carbide (EUA)
		Celgreen	Daicel (Japão)
	Polibutileno tereftalato coadipato (PBAT)	Ecoflex	BASF (Alemanha)
		Biomax	Dupont (EUA)
		Eastar Bio	Eastman Chemical (EUA)

Fonte: Adaptado de MALI; GROSSMANN; YAMASHITA, 2010

Entretanto, os polímeros biodegradáveis possuem uma grande desvantagem em relação aos polímeros convencionais devido ao seu alto custo de produção. O custo médio de produção de um polímero convencional, como o polipropileno, é de aproximadamente US\$ 1 a 2/kg, uma planta de 100.000 toneladas por ano, enquanto que de um polímero biodegradável é cerca de US\$ 5 a 8 o quilo (JURAS, 2013; PELLICANO; PACHEKOSKI; AGNELLI, 2009). O custo de produção do PLA à base de milho pode ser reduzido a uma faixa de US\$ 3 a US\$4/kg (JURAS, 2013;

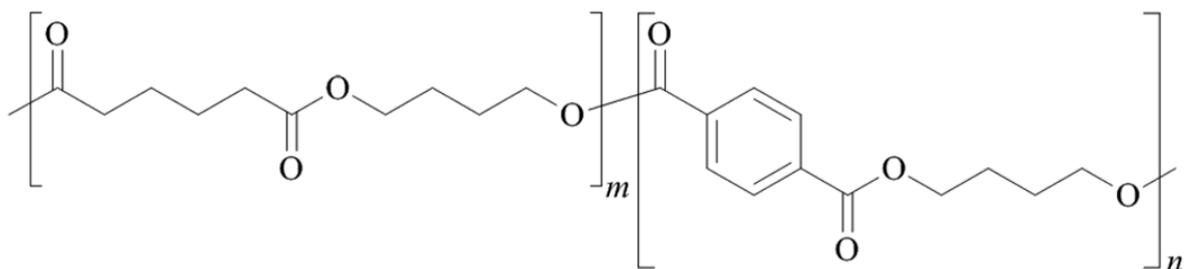
FRANCHETTI; MARCONATO, 2006). Essa diferença nos custos de produção dificulta a colocação dos polímeros biodegradáveis nas indústrias.

Embalagens biodegradáveis custam ao consumidor aproximadamente R\$ 0,19 à unidade, enquanto que as embalagens plásticas convencionais custam de R\$ 0,02 à R\$ 0,04 ao consumidor, custando cerca de R\$ 20,00 o milheiro aos comerciantes (GARDASZ, 2012; DIAZ, 2011).

### 2.5.1 Poli (butileno adipato cotereftalato) (PBAT)

O poli (butileno adipato cotereftalato) (PBAT) é um copolímero alifático-aromático e seus monômeros são 1,4-butanodiol, ácido adípico e ácido tereftálico. É um poliéster de origem fóssil, mas completamente biodegradável devido à sua estrutura química, que combina ótimas propriedades mecânicas com boa capacidade de processamento e, em certas aplicações, substitui plásticos padrão como o polietileno (BASTIOLI, 2014; GEORGIOPOULOS; KONTOU; NIAOUNAKIS, 2014; SIEGENTHALER et al., 2012). Uma representação da sua estrutura química é apresentada na Figura 3.

**Figura 3: Ilustração da estrutura química do PBAT**



Fonte: KÜNKELE et al., 2016

Por ser flexível, sua principal aplicação é na produção de filmes poliméricos por extrusão de curta duração, como por exemplo, as sacolas plásticas (BASTIOLI, 2014).

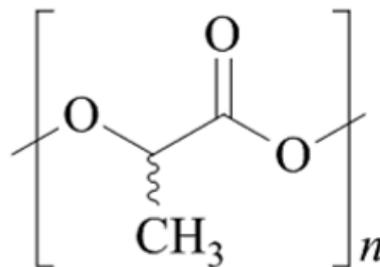
Um trabalho conduzido por Bilck; Grossmann; Yamashita (2010) visou desenvolver filmes biodegradáveis poliméricos a partir de misturas de PBAT com amido de mandioca para aplicação na produção de morangos, onde os resultados mostraram fissuras nas estruturas dos filmes cinco semanas após teste em solo.

Pellicano (2008) avaliou a biodegradação do PBAT em um ensaio de 60 a 180 dias em solo simulado. A evolução da biodegradação foi avaliada através de análise visual, perda de massa, resistência ao impacto e análise morfológica. Os resultados mostraram que após 60 dias de ensaio, os corpos-de-prova já apresentavam fragilidade e mudança de coloração, indicando a ação de fungos.

### 2.5.2 Poli (ácido lático) (PLA)

O Poli (ácido lático) (PLA) é um polímero termoplástico de alta massa molar pertencente à classe dos biopolímeros. Sintetizado a partir do ácido lático, obtido de fontes renováveis através da fermentação bacteriana de produtos agrícolas que contenham carboidratos, como por exemplo o amido de milho e a cana-de-açúcar. Apresenta características biodegradáveis e compostáveis e não é tóxico para o ser humano ou meio ambiente (ARRUDA et al., 2015; VACCIOLI, 2015; YU; DEAN; LI, 2009). Uma representação da sua estrutura química é apresentada na Figura 4.

**Figura 4. Ilustração da estrutura química do PLA**



Fonte: KÜNKEL et al., 2016

O PLA apresenta propriedades mecânicas comparáveis com as dos polímeros provenientes de fontes fósseis, especialmente, elevado módulo de elasticidade, rigidez, transparência, comportamento termoplástico, biocompatibilidade e boa capacidade de moldagem (BRITO et al., 2011).

Pode ser processado de várias formas, principalmente em aplicações que não requerem alto desempenho mecânico. Por conta da rigidez, atualmente possui maior aplicação em misturas para desenvolvimento de filmes flexíveis com polímeros biodegradáveis (SIEGENTHALER et al., 2012).

## 2.6 Blendas poliméricas

Algumas misturas de polímeros, conhecidas como blendas poliméricas, têm sido grandemente empregadas. Blendas poliméricas são sistemas originários da mistura física de dois ou mais polímeros e/ou copolímeros com o objetivo de obter algumas propriedades desejadas (ROSA et al., 2016).

Essas misturas podem ser realizadas para garantir métodos versáteis e econômicos na fabricação de produtos, sendo ainda importante para obtenção de novos materiais com características físicas, químicas e físico-químicas diferenciadas dos seus componentes originais (EVSTATIEV et al., 2013; REN et al., 2009).

Grande parte das pesquisas com blendas poliméricas vem sendo direcionadas ao desenvolvimento de misturas envolvendo polímeros biodegradáveis (VACCIOLI, 2015).

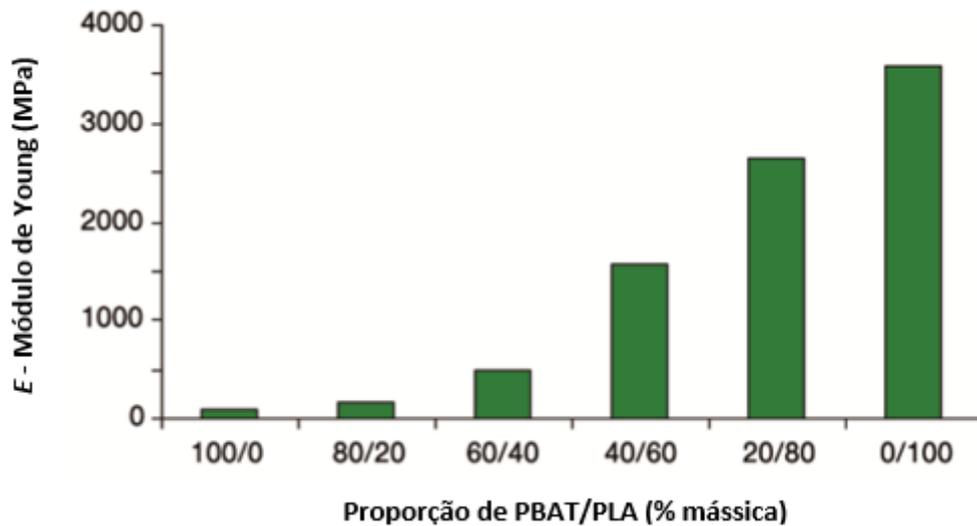
### 2.6.1 Blendas poliméricas de PBAT com PLA

A combinação de PBAT com PLA tem se mostrado muito promissora e tem sido extensivamente investigada por muitos pesquisadores (HONGDILOKKUL et al., 2015). Filmes desenvolvidos com misturas desses polímeros são perfeitamente adaptados para uso em sacolas de resíduos orgânicos, sacos para compras e redes plásticas (SIEGENTHALER et al., 2012). Tanto o PBAT como o PLA são termoplásticos e podem ser processados usando métodos convencionais de processamento (KUCHNIER, 2014).

Em relação às propriedades mecânicas desses polímeros, algumas características são bem distintas. O PLA é quebradiço e com baixa deformação na ruptura, por outro lado, o PBAT é flexível e resistente e possui alta deformação na ruptura (JIANG; WOLCOTT; ZHANG, 2006). Ao considerar essas características, a adição de PBAT ao PLA mostra-se uma boa alternativa para melhorar a fragilidade do PLA (JIANG; WOLCOTT; ZHANG, 2006).

A Figura 5 ilustra o comportamento da rigidez (módulo de Young -  $E$ ) da mistura de PBAT com PLA, em diferentes proporções.

**Figura 5: Comportamento da rigidez das misturas de PBAT com diferentes proporções de PLA**



Fonte: Adaptado de KÜNKELE et al., 2016

O PLA apresenta pouca susceptibilidade ao ataque microbiológico em ambiente natural, sendo a sua degradação altamente dependente das condições do meio e limitada às condições de compostagem. Assim, a incorporação de PBAT no PLA pode modificar as propriedades frágeis do PLA, melhorando sua biodegradabilidade (PALSIKOWSKI, 2015).

Silva; Oliveira; Araújo (2014) avaliaram as propriedades mecânicas e térmicas de sistemas de PLA e PBAT/PLA. De acordo com os resultados, a blenda polimérica PBAT/PLA apresentou maior alongamento na ruptura, devido ao PBAT ser mais flexível que o PLA puro.

Teamsinsungvon; Ruksakulpiwat; Jarukumjorn (2013) prepararam e procederam a caracterização de blendas poliméricas de PBAT com PLA. Os resultados mostraram aumento em algumas propriedades mecânicas (como alongamento na ruptura e resistência ao impacto), mas as propriedades de resistência máxima à tração e módulo de Young diminuíram.

Um estudo teve como objetivo adicionar PBAT em PLA para melhorar a tenacidade da mistura, ou seja, a quantidade de energia que o material pode absorver antes de fraturar. Os resultados mostraram que a tenacidade é melhorada com incorporação de no mínimo 15% em massa de PBAT (ZHANG et al, 2013).

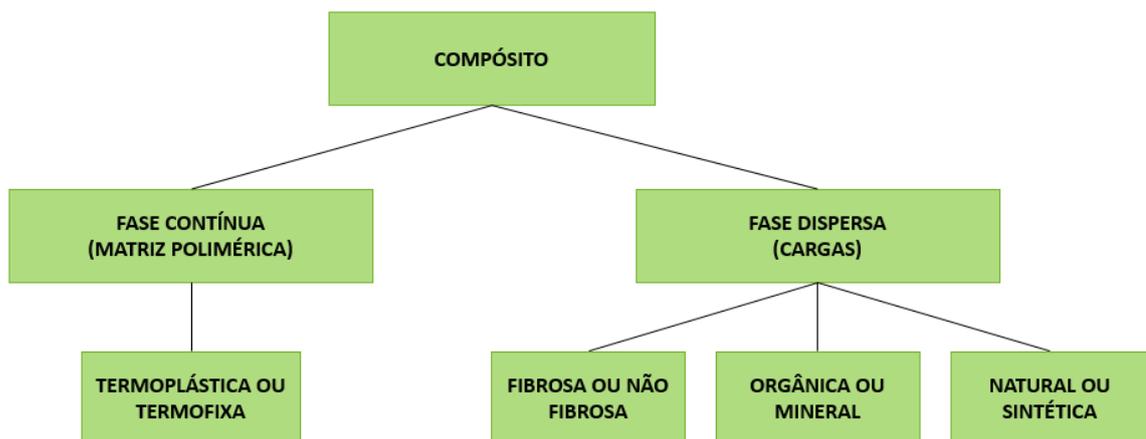
### 2.6.2 Compósitos poliméricos

O termo compósitos poliméricos é utilizado para definir a mistura de um polímero com diversos componentes em sua formulação.

Os compósitos são materiais heterogêneos multifásicos formados por, pelo menos, uma fase contínua e uma descontínua (CANDELORIO, 2011). A fase contínua é um polímero responsável pela transferência de esforços e denominada matriz polimérica. A fase descontínua é chamada de carga. Se o objetivo principal da carga na formulação for reduzir custos, ela será chamada de carga de enchimento ou carga inerte (PASSATORE, 2014).

Na Figura 6 é possível observar os componentes de um compósito polimérico.

**Figura 6: Ilustração dos componentes de um compósito polimérico**



Fonte: Adaptado de PASSATORE, 2014.

### 2.6.3 Cargas minerais

Cargas minerais são materiais sólidos, não solúveis, que são empregados, de uma maneira geral, em misturas de polímeros em quantidades suficientes para a redução de custos nas formulações (SILVA et al., 2013; PELLICANO; PACHEKOSKI; AGNELLI, 2009). Cargas em teores controlados de incorporação, também podem acrescentar propriedades importantes às misturas, tais como aumento da rigidez e resistência mecânica (SHI; DOU, 2014).

Dentre as cargas minerais referenciadas na literatura, pode-se citar o Carbonato de Cálcio ( $\text{CaCO}_3$ ), que se tornou o mineral mais utilizado como elemento

de carga nos processos industriais de papel e plástico (OLIVEIRA; MARTINS, 2009). As propriedades das partículas do  $\text{CaCO}_3$  (tamanho, forma e módulo) podem promover efeitos satisfatórios em blendas poliméricas, especialmente no comportamento mecânico (SILVA et al., 2013).

O estudo conduzido por Silva et al. (2013) teve como objetivo o processamento e a caracterização de uma mistura de PBAT com amido, reforçada com 2%, em massa, de nanopartículas de  $\text{bioCaCO}_3$ , onde os resultados mostraram que a incorporação de  $\text{bioCaCO}_3$  levou à obtenção de um material mais tenaz, com melhores propriedades de resistência à tração. O termo  $\text{bioCaCO}_3$  foi utilizado pelos autores para indicar o  $\text{CaCO}_3$  de origem renovável.

Um outro estudo avaliou as propriedades mecânicas, térmicas, morfológicas e de escoamento de compósitos à base de PEAD e  $\text{CaCO}_3$ . Os resultados mostraram que o aumento do teor de Carbonato de Cálcio incorporado aumentou o módulo de Young e a resistência ao impacto e diminuiu o índice de fluidez (SILVA et al., 2013).

Outro estudo buscou avaliar as propriedades mecânicas da mistura de PBAT/PLA/  $\text{CaCO}_3$ , onde os resultados mostraram que com o aumento do teor de  $\text{CaCO}_3$  incorporado, também houve um aumento no módulo de Young, enquanto que a resistência à tração e o alongamento na ruptura diminuíram (TEAMSINSUNGVON; RUKSAKULPIWAT; JARUKUMJORN, 2010).

## 2.7 Produção e consumo sustentáveis

O tema sustentabilidade começou a ser discutido em 1968, quando o Clube de Roma, organização sem fins lucrativos, publicou o Relatório Limites do Crescimento, documento que faz uma projeção sobre o modelo de desenvolvimento e as consequências do crescimento rápido da população mundial considerando os recursos naturais (JACOBI, 1999).

Em 1987, a Comissão Mundial de Desenvolvimento e Meio Ambiente da Organização das Nações Unidas divulgou o Relatório Nosso Futuro Comum ou Relatório *Brundtland*, que ressalta a responsabilidade de todos os atores da sociedade para a necessidade de uma nova postura ética, que leve em consideração as questões ambientais, equidade das populações e a transformação da economia (WCED, 1987)

Em 1992, foi realizada a segunda Conferência Ambiental ECO 92, sediada no Rio de Janeiro, com a proposta de discutir como promover o desenvolvimento com

respeito à humanidade e ao meio ambiente. Nessa conferência, a comunidade internacional aprovou um documento chamado Agenda 21, com os compromissos de mudança do padrão de desenvolvimento no século 21.

O consumo sustentável foi documentado em 1995 pela Comissão de Desenvolvimento Sustentável da ONU, como:

*“Uso de serviços e produtos que respondem às necessidades básicas de toda a população e trazem a melhoria na qualidade de vida, ao mesmo tempo em que reduzem o uso dos recursos naturais e de materiais tóxicos, a produção de lixo e as emissões de poluição em todo o ciclo de vida, sem comprometer as necessidades das futuras gerações” (MMA, 2014).*

O Plano de Ação para a Produção e Consumo Sustentáveis (PPCS), lançado em 2011, pelo Ministério de Meio Ambiente, tem como objetivo contribuir para o desenvolvimento sustentável da sociedade brasileira, mudando o atual paradigma de produção e consumo (MMA, 2014).

No Brasil, o Conselho Empresarial Brasileiro para o Desenvolvimento Sustentável (CEBDS) foi responsável pela elaboração do primeiro Relatório de Sustentabilidade do país e tem contribuído para a organização e compartilhamento das experiências de empresas brasileiras com os relatórios integrados de sustentabilidade (MMA, 2014).

Deste modo, a crescente necessidade por melhorias do desempenho socioambiental dos produtos tem estimulado o desenvolvimento de técnicas e metodologias para a gestão da sustentabilidade, entre elas o *Global Report Initiative* (GRI), que propõe indicadores sociais, ambientais e econômicos para a elaboração de relatórios de sustentabilidade, e a Produção mais Limpa (P+L), para prevenção de dos impactos ambientais dos processos, produtos e serviços que tem por objetivo aumentar a eficiência da produção e reduzir os riscos para o homem e o meio ambiente. Uma outra técnica é a Avaliação do Ciclo de Vida (UNEP, 2011).

## 2.8 Avaliação do Ciclo de Vida (ACV)

Avaliação do Ciclo de Vida consiste na abordagem dos aspectos e potenciais impactos ambientais ao longo do ciclo de vida do produto, desde a obtenção das matérias-primas até a disposição final (ALLESCH; BRUNNER, 2014).

### 2.8.1 Impactos ambientais e aspectos ambientais

A definição de impacto ambiental é apresentada por Sánchez (2013), como:

*“Alteração da qualidade ambiental que resulta da modificação de processos naturais ou sociais provocada pela ação humana”.*

O impacto ambiental é, claramente, o resultado de uma ação humana, que é a sua causa. Ainda segundo Sánchez (2013), não se deve confundir a causa com a consequência.

Com relação aos aspectos ambientais, esses foram conceituados na norma ABNT NBR ISO 14001:2015 como:

*“Elemento das atividades, produtos ou serviços de uma organização que pode interagir com o meio ambiente”.*

Portanto, aspecto ambiental pode ser entendido como o mecanismo através do qual uma ação humana causa um impacto ambiental (SÁNCHEZ, 2013).

Na Tabela 6 são apresentados alguns exemplos de relação entre a atividade humana, os aspectos ambientais e os impactos ambientais.

**Tabela 6: Exemplos de relações da atividade humana/ aspecto ambiental/ impacto ambiental**

<b>Atividade</b>	<b>Aspecto Ambiental</b>	<b>Impacto Ambiental</b>
Lavagem de roupa	Consumo de água	Redução da disponibilidade hídrica
Lavagem de louça com detergentes	Lançamento de água com detergentes	Aceleração da eutrofização
Cozimento de pão em forno à lenha	Emissão de gases e partículas	Deterioração da qualidade do ar
Pintura de uma peça metálica	Emissão de compostos orgânicos voláteis	Deterioração da qualidade do ar
Armazenamento de combustível	Vazamento	Contaminação do solo e água subterrânea
Transporte de carga por caminhões	Aumento do tráfego	Maior frequência de congestionamentos

Fonte: Adaptado de SÁNCHEZ, 2013

## 2.8.2 Contextualização de ACV

A metodologia de Avaliação do Ciclo de Vida é considerada importante para saber se um produto ou processo é ambientalmente amigável e para avaliar os efeitos que eles exercem sobre o ambiente ao longo de seu ciclo de vida (ICHIKAWA; MIZUKOSHI, 2012).

A ACV, que teve origem na década de 1960, é aplicada em muitos países, com estudos em diversas áreas de pesquisa, os quais têm contribuído para a consolidação da metodologia em todo o mundo. As principais referências na área, devido ao pioneirismo e alto nível dos estudos desenvolvidos, são norte americanas e europeias (WILLERS; RODRIGUES; SILVA, 2013).

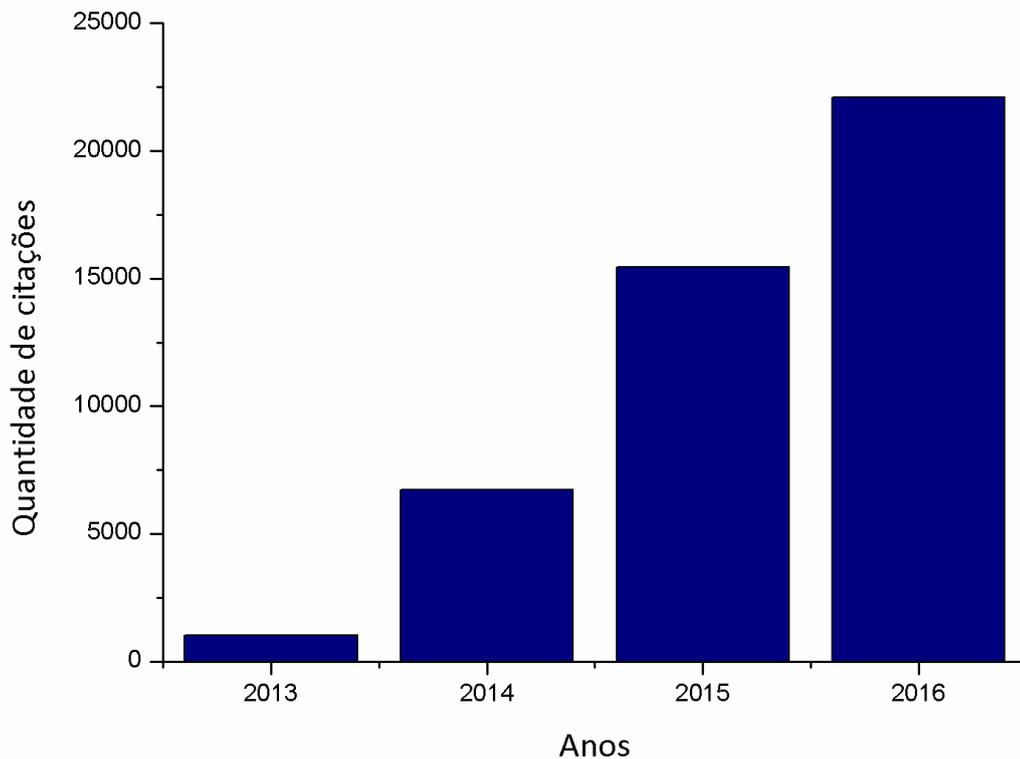
No Brasil, pode-se considerar que a história da ACV teve início na década de 1990, com a criação do subcomitê da ABNT, que trabalhou na elaboração das normas da família ISO 14000 (CHEHEBE, 1997).

Em 2002 foi fundada a Associação Brasileira de Ciclo de Vida (ABCV), a qual vem se dedicando à disseminação e consolidação da ACV no Brasil, principalmente pela organização de eventos na área, onde podemos destacar os mais importantes

para o tema de ACV no Brasil: a Conferência Internacional sobre Avaliação do Ciclo de Vida (CILCA) e o Congresso Brasileiro sobre Gestão do Ciclo de Vida (CBGCV), esse último sendo considerado o principal evento nacional dedicado ao tema ACV (WILLERS; RODRIGUES; SILVA, 2013).

Na Figura 7 é possível observar o crescimento da quantidade de citações com a metodologia de ACV, em diversas áreas de pesquisa, na plataforma *Web of Science*, evidenciando a crescente importância do tema.

**Figura 7: Quantidade de citações por ano, relacionadas à *Life Cycle Assessment* (Avaliação do Ciclo de Vida).**



Fonte: Adaptado de *Web of Knowledge*, 2016

O setor dos materiais plásticos já vem aplicando a metodologia de ACV nos seus produtos e matérias-primas há mais de 10 anos no Brasil (QUEIROZ; GARCIA, 2011).

Andrade et al. (2016) utilizaram a metodologia de ACV para comparar três formas de destinação do PLA: reciclagem química, reciclagem mecânica e

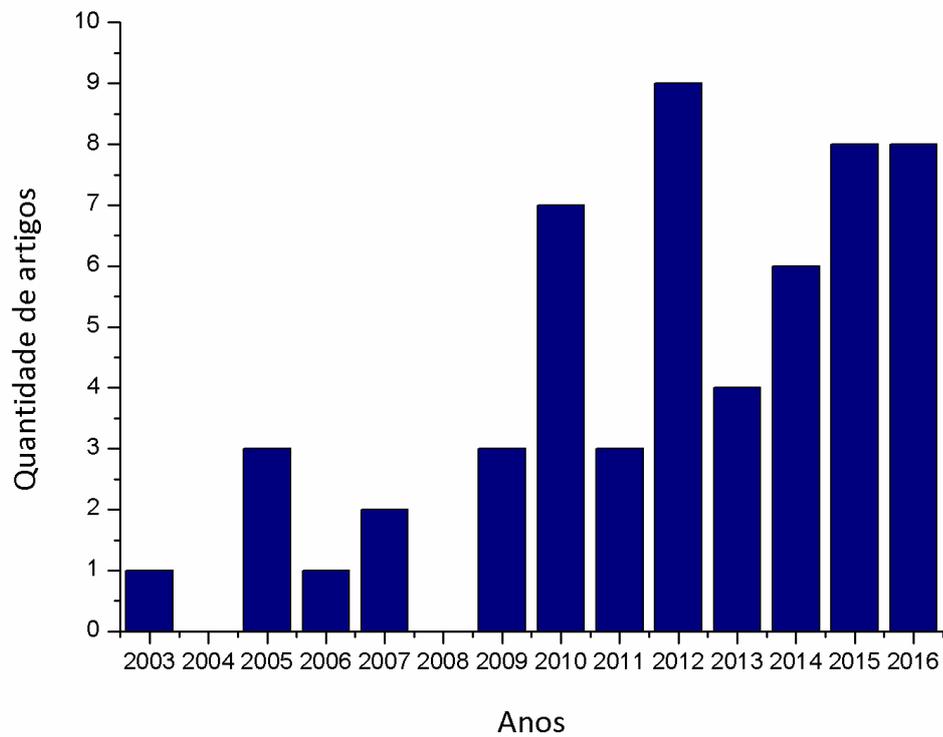
compostagem. O estudo considerou as categorias ambientais: mudanças climáticas, potencial de toxicidade humana e depleção de recursos fósseis. Os resultados mostraram que entre as formas de destinação estudadas, a reciclagem mecânica apresentou o menor impacto ambiental, seguido da reciclagem química e compostagem. Considerando apenas as opções de reciclagem, o insumo mais importante foi o consumo de eletricidade.

O setor de embalagens também vem utilizando a metodologia. As principais vantagens decorrentes da utilização da metodologia de ACV no setor de embalagens são: (a) possibilitar uma visão sistêmica do setor com relação aos impactos ambientais; (b) propiciar a identificação das etapas críticas da produção e do uso, orientando as ações voltadas à melhoria do sistema; (c) sensibilizar todos os atores participantes do sistema para os problemas ambientais envolvidos; (d) oferecer elementos para a orientação de discussões no âmbito sistêmico do processo, em detrimento a pontos específicos; (e) proporcionar informações básicas para a discussão e avaliação das questões ambientais (FORLIN; FARIA, 2002)

Em pesquisa à base de dados *Web of Knowledge*, com relação ao número de artigos científicos publicados com o termo *Life Cycle Assessment* (LCA, ou Avaliação do Ciclo de Vida – ACV, em português) e *bags* (sacolas), verificou-se que há 55 trabalhos publicados desde 1945 e um total de 467 citações.

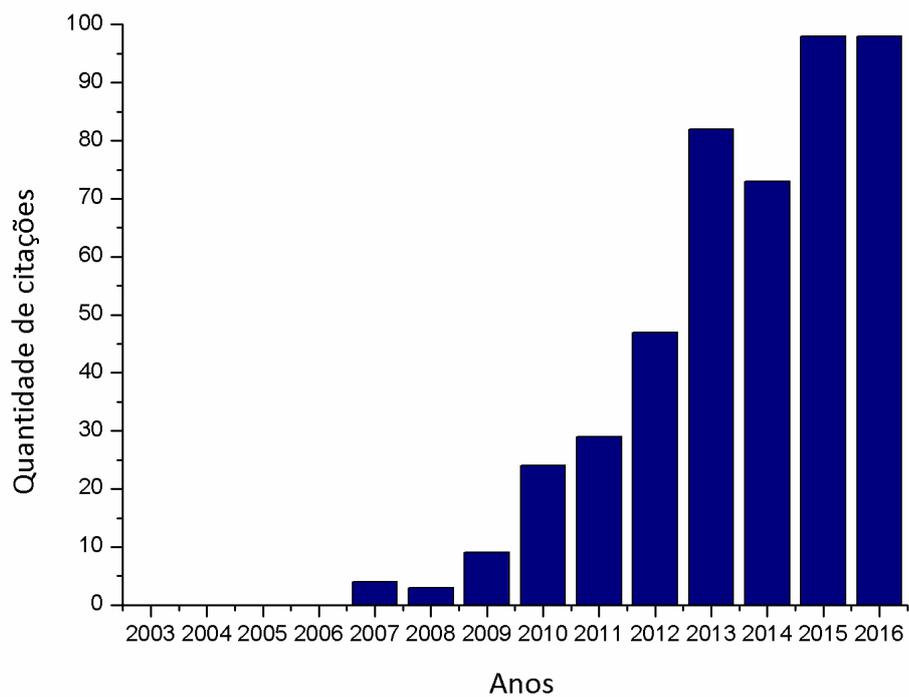
As Figuras 8 e 9 destacam a crescente importância do tema referido na comunidade acadêmica, nos últimos 13 anos.

**Figura 8: Quantidade de artigos publicados por ano, relacionados à *Life Cycle Assessment* e *bags*.**



Fonte: Adaptado de *Web of Knowledge*, 2016

**Figura 9: Quantidade de citações por ano, relacionadas à *Life Cycle Assessment* e *bags*.**

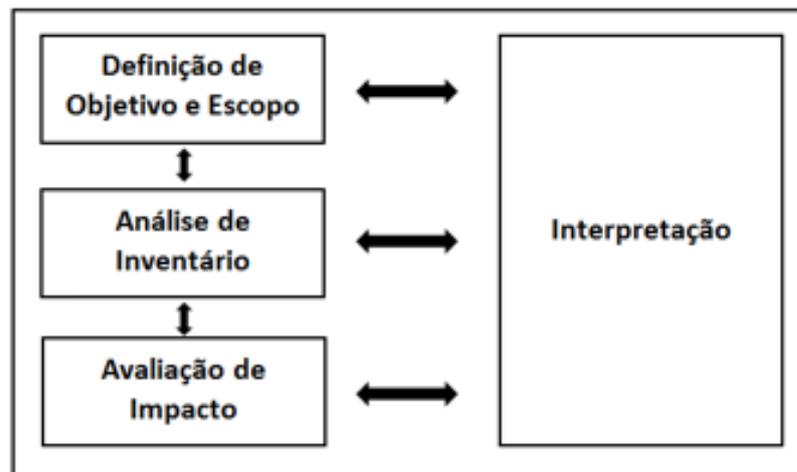


Fonte: Adaptado de *Web of Knowledge*, 2016

### 2.8.3 Processo de condução de um estudo de ACV

O processo de condução de um estudo de ACV é sistemático e composto por quatro etapas: definição de objetivo e escopo, análise de inventário, avaliação de impactos e interpretação dos resultados, conforme ilustra a Figura 10 (MAZUR, 2011).

**Figura 10: Interação entre as etapas da ACV**



Fonte: Adaptado da ABNT NBR ISO 14040:2009

#### 2.8.3.1 Definição de Objetivo e Escopo

A primeira etapa da ACV, intitulada de definição de objetivo e escopo, visa estabelecer bases e diretrizes conceituais para a realização do estudo. Nessa etapa, deve-se especificar o objetivo para qual o estudo está sendo realizado e a definição do escopo, onde são estabelecidos os elementos estruturais que farão parte da ACV, como função, unidade funcional, fronteiras e sistema de produto (ABNT NBR ISO 14040:2009).

Segundo a ABNT NBR ISO 14044:2009, todo escopo de uma ACV deve especificar a função pretendida para o produto ou processo em avaliação. A função é a definição das características que o sistema estudado irá desempenhar.

Unidade Funcional (UF) é a medida do desempenho quantificado de um sistema de produto, de acordo com sua função, para utilizar como unidade de referência (ABNT NBR ISO 14044:2009).

Sistema de produto é o conjunto de processos, interligados material e energeticamente, necessário para o atendimento da função estabelecida no estudo (SILVA; OLIVEIRA, 2014).

O escopo da Avaliação do Ciclo de Vida não se baseia apenas em uma avaliação geral, existem diversas abordagens que podem ser consideradas:

- **Berço ao túmulo:** abordagem que considera todas as fases do ciclo de vida do produto, desde a extração da matéria-prima, passando pela produção, pelo uso até chegar na fase de destinação final.
- **Berço ao berço:** considera desde a extração da matéria-prima (berço) até a destinação final, onde o produto retorna a um novo processo, como por exemplo o processo de reciclagem, fechando o ciclo produtivo.
- **Berço ao portão (portão de fábrica, fazenda ou outra organização):** considera desde a extração de recursos ("berço") até o portão da fábrica, fazenda ou outra organização. As fases de uso e destinação final são omitidas neste caso.
- **Portão ao portão:** é uma abordagem que avalia apenas um valor agregado no processo produtivo. O escopo envolve um processo em que todas as fases de produção ocorrem dentro de um mesmo local (indústria, fazenda etc). Os processos que estão fora dos portões do local definido não estão incluídos.

### 2.8.3.2 Análise de Inventário

A análise de inventário busca a identificação e quantificação das entradas (materiais e energia) e saídas (efluentes líquidos, emissões gasosas e resíduos sólidos) relevantes de um sistema de produto ao longo de seu ciclo de vida. Essa etapa compreende a coleta de dados, procedimentos de cálculos e de alocação. (ABNT NBR ISO 14040:2009). Segundo a ABNT NBR ISO 14044:2009, os dados qualitativos e quantitativos devem ser coletados para cada processo elementar incluído na fronteira do sistema. Os dados coletados (sejam eles medidos, calculados ou estimados) são utilizados para quantificar as entradas e saídas de um processo elementar. A ABNT também estabelece que os dados coletados devem ser validados e correlacionados aos processos elementares, aos fluxos de referência e à UF.

### 2.8.3.3 Avaliação de Impacto

Esta é a etapa da Avaliação do Ciclo de Vida que visa ao entendimento e à avaliação da magnitude e significância dos impactos ambientais potenciais de um sistema de produto ao longo do ciclo de vida do produto (SILVA; OLIVEIRA, 2014).

### 2.8.3.4 Interpretação dos Resultados

Na última etapa da ACV as constatações obtidas nas fases Análise de Inventário e Avaliação de Impacto são analisadas em conjunto a fim de se apresentar conclusões, limitações e recomendações (ABNT NBR ISO 14040:2009).

## 2.9 Ecoeficiência

O conceito de Ecoeficiência foi elaborado em 1992 pelo *World Business Council for Sustainable Development* (WBCSD), representado no Brasil pelo Conselho Empresarial Brasileiro para o Desenvolvimento Sustentável (CEBDS), que oferece a definição:

*“A ecoeficiência é alcançada mediante o fornecimento de bens e serviços a preços competitivos que satisfaçam as necessidades humanas e tragam qualidade de vida, ao mesmo tempo em que reduzam progressivamente o impacto ambiental e o consumo de recursos ao longo do ciclo de vida a um nível, no mínimo, equivalente à capacidade de sustentação estimada da Terra” (WBCSD, 2000).*

Portanto, a ecoeficiência visa à produção sustentável de bens e serviços para a sociedade, agregada de valor, não pela ampliação do consumo de recursos naturais, mas sim, pela sua redução e minimização ou eliminação da geração de qualquer tipo de poluição (CARVALHO; GOMES, 2008).

Segundo Gasi e Ferreira (2006), os sete elementos da Ecoeficiência propostos são:

- Reduzir o consumo de materiais com bens e serviços;
- Reduzir o consumo de energia com bens e serviços;
- Reduzir a dispersão de substâncias tóxicas;
- Intensificar a reciclagem de materiais;
- Maximizar o uso sustentável de recursos renováveis;
- Prolongar a durabilidade dos produtos;
- Agregar valor aos bens e serviços.

Podemos ainda destacar, dentre os objetivos do WBCSD, o que diz respeito à redução do consumo de recursos que inclui a minimização da utilização de energia, materiais, água e solo, englobando a reciclabilidade e a durabilidade do produto e fechando o ciclo dos materiais (CARVALHO; GOMES, 2008).

## **2.10 Análise de Ecoeficiência**

A metodologia de Análise de Ecoeficiência foi desenvolvida pela BASF SE (*Societas Europaea*), na Alemanha, na década de 1990 e quantifica a sustentabilidade de produtos e processos, considerando os impactos ambientais e econômicos relativos a um nível econômico ou negócio (ALLESCH; BRUNNER, 2014; NSF, 2013).

A Análise de Ecoeficiência é baseada na metodologia de Avaliação do Ciclo de Vida e é usada para comparação de produtos que atendam à mesma função, conforme proposto na ABNT NBR ISO 14045 (2014), a fim de gerar informações para tomada de decisão. Outra utilização importante é verificar a evolução dos processos produtivos, mediante melhorias realizadas ao longo do tempo, uma vez que tenham sido identificados os principais pontos e estágios passíveis de melhorias.

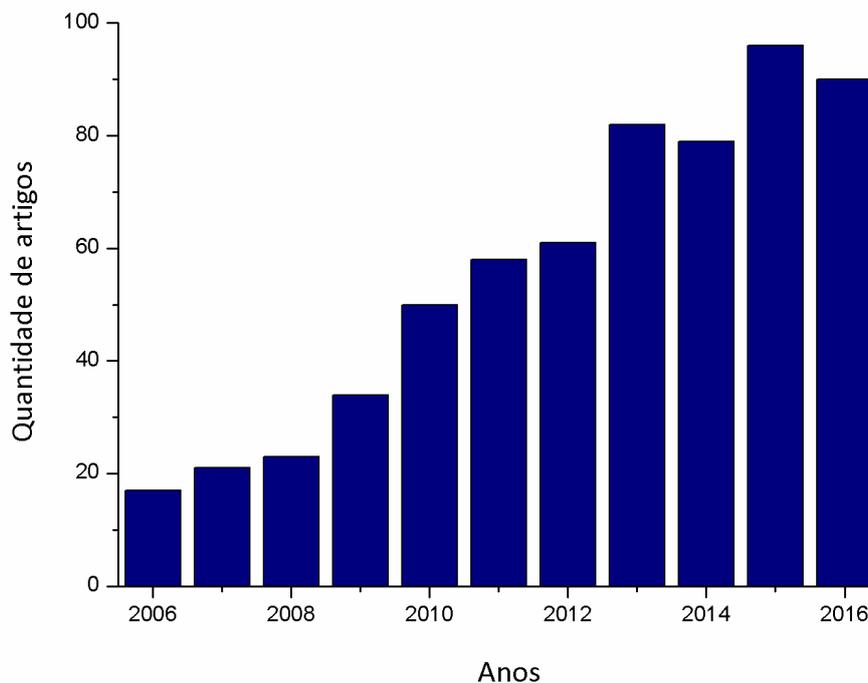
Para definir as vantagens na utilização de polímeros biodegradáveis, em comparação com aqueles *commodities*, os custos decorrentes dos processos e os impactos ambientais precisam ser considerados. Para isso, a Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) constitui uma ferramenta adequada, especialmente quando acompanhada da avaliação de custos e quando aborda todos os estágios do ciclo de vida, segundo a abordagem do berço ao túmulo ou do berço ao berço (SIEGENTHALER et al., 2012).

Ao olhar para o ciclo de vida de polímeros biodegradáveis, dois aspectos são importantes: as opções de destinação final e a utilização de recursos renováveis na produção dos materiais (sendo que grande parte dos polímeros biodegradáveis são feitos de blendas de polímeros à base de fosseis e de polímeros derivados de biomassa) (KÜNKEL et al., 2016).

Mudanças na legislação, maior interesse dos consumidores em produtos ambientalmente amigáveis e o interesse dos varejistas para se diferenciar são os principais fatores para o crescimento do mercado de sacolas biodegradáveis (KÜNKEL et al., 2016).

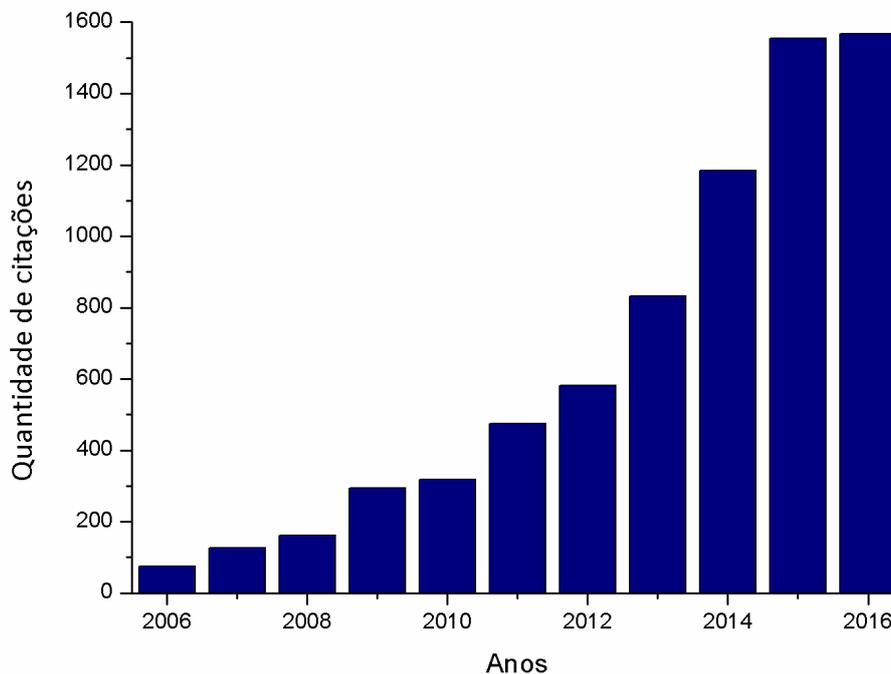
Em pesquisa à base de dados de publicações acadêmicas *Web of Knowledge* com os termos *Eco-efficiency Analysis* (Análise de Ecoeficiência) e *bags* (sacolas), verificou-se que não existem trabalhos publicados, considerando o período de 1945 a 2016. E, somente para o termo *Eco-efficiency Analysis*, foram verificados 666 artigos e um número total de 7.307 citações desde 1998. As Figuras 11 e 12 apresentam o crescimento constante de estudos abordando o tema nos últimos 10 anos.

**Figura 11: Quantidade de artigos publicados nos últimos dez anos, relacionados à *Eco-efficiency Analysis***



Fonte: *Web of Knowledge*, 2016

**Figura 12: Quantidade de citações nos últimos dez anos, relacionados à *Eco-efficiency Analysis***



Fonte: *Web of Knowledge*, 2016

O tema ecoeficiência vem crescendo no mundo, devido à busca por melhoria contínua das indústrias, resultando em análises cada vez mais precisas e completas.

Recentemente, uma Análise de Ecoeficiência comparando duas tecnologias de tratamento de resíduos sólidos urbanos (incineração com recuperação de energia e disposição em aterros) foi realizada no Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN). Os resultados obtidos por esse trabalho apontaram a incineração com recuperação de energia como uma alternativa mais ecoeficiente do que a disposição em aterros com 65% de eficiência na coleta e tratamento do biogás, sendo a etapa de recuperação de energia fundamental para esse resultado (DMITRIJEVAS, 2010).

A análise proposta por Vianna (2006) visou avaliar a ecoeficiência do petrodiesel e do biodiesel (produzido por esterificação do óleo de dendê via rota etílica). Um dos resultados mostrou que o melhor desempenho do biodiesel era relacionado à categoria ambiental de consumo de recursos energéticos, no que diz respeito à produção das principais matérias-primas envolvidas (etanol e óleo de dendê), que são autossuficientes energeticamente.

Em uma análise sobre a geração de energia elétrica, alunos da Faculdade Oswaldo Cruz compararam tecnologias de geração de energia elétrica no Brasil,

desde as extrações de matérias primas até a geração de uma quantidade especificada de energia elétrica, a partir de diferentes rotas tecnológicas. Os resultados apresentam a usina fotovoltaica como a alternativa mais ecoeficiente e a usina termoelétrica como a alternativa com o pior desempenho ambiental, em uma comparação com abordagem berço ao portão (MUSLEH et al., 2013).

## **2.11 Categorias de Impacto Ambiental da Análise de Ecoeficiência**

As categorias de Impacto Ambiental consideradas na metodologia de Análise de Ecoeficiência são: Demanda Acumulada de Energia, Consumo de Recursos Abióticos, Uso da Terra, Emissões, Água Consuntiva, Doenças e Acidentes Ocupacionais e Potencial de Toxicidade Humana.

### **2.11.1 Demanda Acumulada de Energia**

Essa categoria calcula a entrada total de energia primária associada ao ciclo de vida estudado de cada alternativa. Todas as formas de energia utilizadas ao longo do ciclo de vida são convertidas para fontes de energia primária, tais como: carvão, petróleo, gás natural, lignita, energia nuclear, entre outras. O consumo de energia é contabilizado em *megajoule* (MJ) por Unidade Funcional (UF) (SALING et al., 2002).

### **2.11.2 Consumo de Recursos Abióticos**

O Consumo de Recursos Abióticos é calculado com base na disponibilidade dos recursos naturais consumidos e da taxa de consumo típica desses recursos, segundo informações do *US Geological Survey*, ao longo do ciclo de vida de cada alternativa estudada. O fator de criticidade do consumo de cada recurso é calculado com base na disponibilidade mundial (em toneladas) desse recurso e no tempo de disponibilidade das fontes exploráveis, dadas as condições atuais de consumo. Quanto menor a reserva do recurso e mais alta a sua taxa de consumo, mais escasso tende a ser este recurso, portanto maior será seu fator de criticidade (SALING et al., 2002). A Equação 1 apresenta a fórmula para cálculo do fator de criticidade ou fator de equivalência (Fe).

$$Fe = \frac{1000}{\text{reserva mundial}} \cdot \sqrt{\frac{\text{reserva mundial}}{\text{duração da reserva mundial}}} \quad \text{Equação (1)}$$

Fonte: SALING et al., 2002

A Tabela 7 apresenta alguns fatores de criticidade, de acordo com a metodologia Análise de Ecoeficiência, para os principais Recursos Abióticos.

**Tabela 7: Alguns fatores de criticidade calculados para alguns recursos**

<b>Recurso Abiótico</b>	<b>Duração da reserva mundial (em anos)</b>	<b>Reserva mundial explorável (em milhões de toneladas)</b>	<b>Fator de criticidade (Fe)</b>
Alumínio	250	25.000	0,0001600
Bauxita	132	29.000	0,000262
Cobre	43	690	0,034
Cromo	263	7.600	0,71
Manganês	86	660	4,20
Cloreto de Sódio	1000	18.000.000	0,01
Petróleo	47	172.000	0,35
Basalto	1000	18.000.000	0,01
Dolomita	500	18.000.000	0,01
Gás Natural	65	124.000	0,35
Urânio	37	2	108,40
Carvão	162	487.000	0,11
Enxofre	40	1.400	4,23
Zinco	24	190	14,81
Areia	1000	18.000.000	0,01

Fonte: *US GEOLOGICAL SURVEY, 2015*

Todos os recursos são somados após serem convertidos a uma base comum, para obtenção de um índice único. Para fins de caracterização o elemento Prata (kg de prata equivalente) é utilizado como referência. Para calcular as equivalências em kg de prata, simplesmente divide-se o valor total do fator do elemento em questão pelo fator de criticidade de consumo da prata.

### 2.11.3 Emissões

Essa categoria compreende os resíduos sólidos, os efluentes e as emissões atmosféricas.

#### 2.11.3.1 Resíduos Sólidos

A categoria de impacto ambiental Resíduos Sólidos é subdividida em cinco subcategorias: resíduo municipal, resíduo industrial/químico, resíduo radioativo, resíduo de construção e resíduo de mineração.

A metodologia utiliza como critério, para estabelecimento do nível de impacto dos resíduos, o custo de disposição e tratamento de cada tipo de resíduo na Europa, (tendo como referência o resíduo sólido municipal) atribuindo-lhes fatores, conforme descrito na Tabela 8.

**Tabela 8: Fatores de equivalência para Resíduos Sólidos**

<b>Tipo de Resíduo</b>	<b>Fator</b>
Resíduo Municipal	1
Resíduo Industrial/ Químico	6
Resíduo Radioativo	300.000
Resíduo de Construção	0,60
Resíduo de Mineração	0

Fonte: SALING et al., 2002

O valor dessa categoria de impacto corresponde à somatória da quantidade de cada um dos tipos de resíduo gerados no ciclo de vida, multiplicado pelo fator de caracterização correspondente. O resultado será expresso em quilograma (kg) de resíduo municipal por Unidade Funcional (UF).

#### 2.11.3.2 Efluentes

A categoria de impacto ambiental Efluentes é avaliada através do cálculo do volume crítico de diluição, que se constitui em uma métrica teórica para considerar

não apenas a quantidade de emissões liberadas na água, como também o impacto ambiental causado pelos produtos emitidos. A categoria é subdividida em dez indicadores, sendo oito poluentes potenciais (N-total (Nitrogênio total), NH<sub>4</sub>-N (Nitrogênio amoniacal), P-total (Fósforo total), AOX (Halogênio Orgânico Absorvível), metais pesados, hidrocarbonetos, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> (Sulfatos) e Cl<sup>-</sup> (Cloretos) e os outros dois, utilizados para caracterizar a quantidade de matéria orgânica na água (Demanda Química de Oxigênio (DQO) e Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO)).

É estimada a quantidade de água necessária para diluir cada um dos poluentes contidos no efluente de forma que cada um destes, individualmente, não seja nocivo ao meio ambiente. Para tanto, de acordo com Saling et al (2002), utiliza-se o limite crítico aceitável de cada substância, determinado pela legislação alemã (*Regulation on requirements for the discharge of wastewater into surface waters*, de 27 de março de 1997), para descarga de efluentes em corpos hídricos. A Tabela 9 apresenta os valores de limites críticos para os poluentes.

**Tabela 9: Valores limites para Efluentes**

<b>Poluentes</b>	<b>Limite</b>
DQO	75 mg/L
N-total	50 mg N/L
P-total	2 mg P/L
AOX	1 mg/L
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	10.000 mg/L
Cl <sup>-</sup>	10.000 mg/L
Hg	0,001 mg/L
Cd	0,005 mg/L
Cr-total	0,05 mg/L
Zn	0,2 mg/L
Cu	0,1 mg/L
Ni	0,05 mg/L
Pb	0,05 mg/L
Sn	0,2 mg/L

Fonte: ABWASSERVERORDNUNG (ABVV), 2012

Portanto, o valor desta categoria corresponde à somatória da quantidade de água necessária para diluir cada um dos poluentes individualmente, expresso em litros por Unidade Funcional.

### **2.11.3.3 Emissões Atmosféricas**

As emissões atmosféricas são calculadas em função das emissões geradas, em quilograma por Unidade Funcional, ao longo do ciclo de vida e considera os seguintes impactos potenciais: Aquecimento Global, Depleção da Camada de Ozônio, Formação Fotoquímica de Ozônio e Potencial de Acidificação.

No Potencial de Aquecimento Global, todos os gases que contribuem para reter as radiações infravermelhas na crosta terrestre e aumentar a temperatura da terra, são convertidos a CO<sub>2</sub> equivalente. Ou seja, o efeito de cada gás é expresso na quantidade de dióxido de carbono que causaria o mesmo impacto. A expressão dos resultados se dá em termos de g CO<sub>2</sub> equivalente/ Unidade Funcional.

Na categoria de Potencial de Depleção da Camada de Ozônio, são considerados os gases que contribuem para potencializar o efeito da redução da camada de ozônio na estratosfera, ou seja, os hidrocarbonetos halogenados. Os potenciais impactos são calculados em função da massa gerada por Unidade Funcional (IPCC, 2006). O gás de referência para esta categoria de impacto ambiental é o triclorofluormetano (CFC11), sendo o resultado expresso em g CFC11 equivalente/ Unidade Funcional.

Na Análise de Ecoeficiência, as emissões de gases que contribuem para o Potencial de Formação Fotoquímica de Ozônio são calculadas em termos de massa de gases gerados, em quilograma por Unidade Funcional. O gás de referência para esta categoria de impacto ambiental é o eteno (C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>), sendo o resultado final expresso em termos de g C<sub>2</sub>H<sub>2</sub> equivalente/ Unidade Funcional.

Na categoria de Potencial de Acidificação, os resultados também são calculados em função da massa de emissões geradas ao longo do ciclo de vida por Unidade Funcional. Neste caso, o gás referência é o SO<sub>2</sub>, sendo o resultado final expresso em termos de g SO<sub>2</sub> equivalente/ Unidade Funcional.

#### **2.11.4 Uso da Terra**

Essa categoria de impacto ambiental estabelece um fator de equivalência, que aponta o quão impactante um processo/produto é em relação à ocupação e ao uso de uma área para que este possa ser realizado. Esses fatores indicam o grau de antropização imposto às áreas naturais para o desenvolvimento das distintas atividades econômicas. Ou seja, a categoria de Uso da Terra avalia os impactos ambientais sobre a biodiversidade através da ocupação e transformação da terra, em m<sup>2</sup> de área ocupada por Unidade Funcional (KÖLLNER; SCHOLZ, 2007).

#### **2.11.5 Água Consuntiva**

A Análise de Ecoeficiência utiliza a metodologia para avaliação de água consuntiva definida por Pfister; Koehler; Hellweg (2009), para quantificação do consumo de água total ao longo do ciclo de vida de cada alternativa. A metodologia de avaliação de água consuntiva representa o consumo total de água, seja por assimilação ao produto final, perdida por evaporação ou descartada em forma de efluente líquido.

A categoria ainda utiliza fatores de caracterização regionais específicos, considerando as bacias hidrográficas correspondentes e danos ambientais decorrentes do uso para cada uma dessas áreas, pois é necessário considerar o estresse hídrico da região, para ponderar quão impactante esse processo é para a manutenção da quantidade e qualidade hídrica, representada pela categoria de impacto ambiental Água Consuntiva. O resultado é representado pelo uso de água consuntiva em litros por Unidade Funcional (litros/ UF).

#### **2.11.6 Doenças e Acidentes Ocupacionais**

A categoria Potencial de Acidentes e Doenças Ocupacionais considera o número e gravidade de perigos físicos às pessoas envolvidas ao longo do ciclo de vida. São considerados perigos físicos: acidentes de trabalho com afastamento, acidentes fatais e doenças ocupacionais.

Os dados de referência são obtidos através do Anuário Estatístico de Acidentes do Trabalho (Brasil, 2009). Todos os dados são classificados de acordo com o Código

Nacional de Atividade Econômica (CNAE 2.0), classificação desenvolvida pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) e derivada do ISIC 4 (*International Standard Industrial Classification of All Economic Activities*), utilizada para classificar dados estatísticos referentes à população, produção, emprego e outras estatísticas econômicas. Os dados referentes a cada processo específico são usualmente coletados junto aos produtores de cada alternativa em estudo.

### **2.11.7 Potencial de Toxicidade Humana**

O Potencial de Toxicidade Humana é uma categoria de impacto potencial mensurada na Análise de Ecoeficiência e em outras ferramentas para gestão da sustentabilidade. É basicamente avaliado através do input dos dados de toxicologia das substâncias envolvidas nas diferentes fases dos processos, em cada estágio do ciclo de vida, tomando como base as informações apresentadas pelas FISPQs (Ficha de Informações de Segurança de Produto Químico) ou MSDS (*Material Safety Data Sheet*).

Fatores como quantidades das substâncias envolvidas nos processos, bem como os níveis de exposição humana às mesmas são determinantes para definição do seu potencial impacto.

### **2.12 Impactos Econômicos na Análise de Ecoeficiência**

Os Impactos Econômicos na Análise de Ecoeficiência são abordados através do levantamento de todos os custos que ocorrem durante o ciclo de vida do produto ou do processo analisado. São considerados custos como: investimentos, compra de equipamentos, mão-de-obra, salários, manutenção, entre outros (SALING et al., 2002).

### **2.13 Fator de Relevância Ponderado (ambiental e social)**

O fator de relevância determina as principais contribuições das categorias de impacto para os resultados da análise realizada portanto, quanto maior o fator, maior a importância da categoria no processo estudado. Isso impede que categorias que apresentem baixos impactos relativos ao conjunto de todos os impactos avaliados

sejam analisados com o mesmo grau de importância que aquelas categorias que apresentam altos impactos relativos, durante o ciclo de vida estudado.

O fator de relevância é determinado pela média geométrica do produto entre o fator de relevância ambiental e o fator de percepção social.

### **2.13.1 Fator de Relevância Ambiental**

A relevância ambiental pode ser entendida como a contribuição de impactos individuais para o impacto total gerado num determinado contexto, para que se possa atingir a Unidade Funcional estabelecida. O fator de relevância é calculado dividindo o impacto ambiental da categoria em avaliação pelo impacto total, para a mesma categoria de impacto, na região ou país no qual é conduzida a avaliação.

### **2.13.2 Fator de Percepção Social**

O fator de percepção social considera a importância atribuída pela sociedade a cada categoria de impacto ambiental.



### **3 OBJETIVOS**

#### **3.1 Objetivo geral**

Desenvolver e caracterizar filmes poliméricos biodegradáveis para aplicação em sacolas descartáveis de supermercado e realizar sua Análise de Ecoeficiência, em comparação com outras alternativas de sacolas utilizadas atualmente.

#### **3.2 Objetivos específicos**

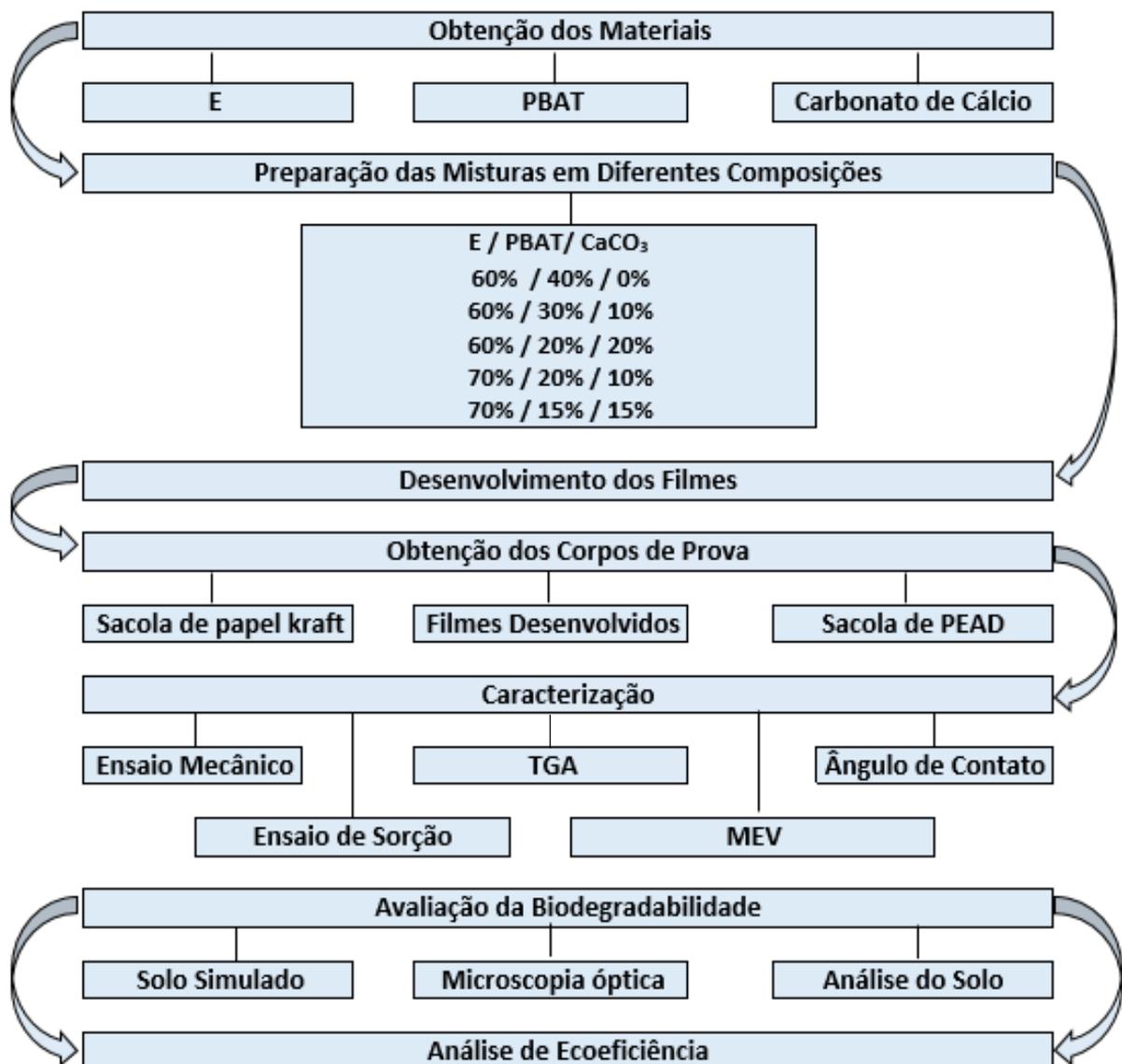
- Desenvolver filmes poliméricos biodegradáveis com incorporação de Carbonato de Cálcio, tendo como finalidade reduzir os custos de produção;
- Caracterizar as propriedades mecânicas e térmicas dos filmes poliméricos desenvolvidos e das sacolas de papel kraft e de polietileno de alta densidade;
- Avaliar o efeito da adição de Carbonato de Cálcio nos aspectos morfológicos, na estabilidade térmica e nas propriedades mecânicas dos filmes desenvolvidos;
- Avaliar a biodegradação, em solo simulado, dos filmes poliméricos desenvolvidos e das sacolas de papel kraft e de polietileno de alta densidade;
- Avaliar os aspectos e potenciais impactos ambientais e impactos econômicos da produção, utilização e destinação final de sacolas manufaturadas com os filmes poliméricos desenvolvidos;
- Realizar uma Análise de Ecoeficiência comparativa entre as sacolas manufaturadas com os filmes desenvolvidos e as sacolas de papel kraft e de polietileno de alta densidade, com abordagem do berço ao berço.



## 4 METODOLOGIA

Para uma maior compreensão da metodologia empregada nesta dissertação, a Figura 13 esquematiza as etapas envolvidas no desenvolvimento dos filmes poliméricos biodegradáveis, na caracterização das amostras, avaliação da biodegradabilidade e Análise de Ecoeficiência.

**Figura 13: Apresentação esquemática da metodologia geral empregada nesta dissertação**



Fonte: Elaborado pela autora, 2016

## 4.1 Materiais

Nesse desenvolvimento, as matérias-primas utilizadas para a produção dos filmes foram:

- Blenda polimérica de PBAT com PLA e aditivos, desenvolvida por uma indústria química na Alemanha, denominada nessa dissertação de material “E”. Algumas informações da mistura “E” podem ser visualizadas na Tabela 10.

**Tabela 10: Algumas informações do material “E”**

ID número	30593361/SDS
Densidade	0,8 – 1,4 g/cm <sup>3</sup>
Temperatura de Fusão	110 – 120 °C
Temperatura de decomposição	>280 °C

Fonte: Adaptado de Safety Data Sheet, 2015

- Poli (butileno adipato co-tereftalato) (PBAT), fabricado por uma empresa química na Alemanha. Algumas informações do PBAT utilizado podem ser observadas na Tabela 11.

**Tabela 11: Algumas informações do PBAT**

ID número	30516354/SDS
Densidade	0,8 – 1,4 g/cm <sup>3</sup>
Temperatura de Fusão	100 – 120 °C
Temperatura de decomposição	>280 °C

Fonte: Adaptado de Safety Data Sheet, 2015

- Carbonato de Cálcio (CaCO<sub>3</sub>) Ultrafine 450 da CARBOfine Carbonatos Finos Ltda. (Espírito Santo, Brasil). Na Tabela 12 estão apresentadas algumas informações técnicas do fabricante sobre o CaCO<sub>3</sub>.

**Tabela 12: Informações técnicas do fabricante sobre o  $\text{CaCO}_3$** 

Nome do produto	Carbonato de Cálcio Natural Moído
Número CAS	1317-65-3
Uso recomendado	Carga Mineral
Ponto de fusão	1200 °C
Densidade aparente	0,9 g/cm <sup>3</sup>
Temperatura de decomposição	>250 °C

Fonte: Elaborado pela autora, 2016

Para caracterização e avaliação da biodegradabilidade, também foram utilizadas:

- Sacolas plásticas, denominadas de polietileno de alta densidade (PEAD), obtidas em um supermercado da região;
- Sacolas de papel kraft, obtidas em uma loja comercial da região.

#### 4.2 Preparação das misturas poliméricas

Buscando a realização de um estudo abrangente, foram preparados filmes poliméricos biodegradáveis com diferentes formulações, conforme apresentado na Tabela 13.

**Tabela 13: Composições dos filmes poliméricos biodegradáveis preparados que foram estudados nessa dissertação**

Composições	% mássica		
	E	PBAT	Carbonato de Cálcio
1	60	40	0
2	60	30	10
3	60	20	20
4	70	20	10
5	70	15	15

Fonte: Elaborado pela autora, 2015.

Visto que o material “E” é um polímero flexível, proporções de PBAT foram incorporadas na mistura, com o intuito de melhorar algumas propriedades mecânicas

dos filmes desenvolvidos. Também foram incorporadas diferentes proporções de Carbonato de Cálcio, com o objetivo principal de redução de custos.

Posteriormente à preparação das misturas poliméricas, foram estabelecidas as sete amostras analisadas nessa dissertação, conforme Tabela 14.

**Tabela 14: Amostras preparadas e caracterizadas nessa dissertação**

<b>Amostras</b>	<b>E</b>	<b>PBAT</b>	<b>Carbonato de Cálcio</b>
E <sub>60</sub> P <sub>40</sub> C <sub>0</sub>	60	40	0
E <sub>60</sub> P <sub>30</sub> C <sub>10</sub>	60	30	10
E <sub>60</sub> P <sub>20</sub> C <sub>20</sub>	60	20	20
E <sub>70</sub> P <sub>20</sub> C <sub>10</sub>	70	20	10
E <sub>70</sub> P <sub>15</sub> C <sub>15</sub>	70	15	15
S <sub>KRAFT</sub>	Sacola de papel kraft		
S <sub>PEAD</sub>	Sacola de polietileno de alta densidade		

Fonte: Elaborado pela autora, 2015

### 4.3 Desenvolvimento dos filmes poliméricos

As matérias-primas, de acordo com a Tabela 14, foram previamente misturadas manualmente, secas em estufa a 50°C por 72 horas e processadas em uma extrusora monorosca (AX-Plásticos – Santo André, Brasil), com L/D=26 e três zonas de aquecimento (140/162/178°C).

Após o processamento na extrusora monorosca, as amostras foram cortadas em granulador na forma de *pellets*, conforme ilustrado nas Figuras 14 e 15. Esse processo foi repetido três vezes consecutivas, para melhor homogeneidade das formulações.

**Figura 14: Ilustração de algumas amostras obtidas na forma de *pellets***



Fonte: Elaborado pela autora, 2015

**Figura 15: Ilustração dos detalhes dos *pellets* obtidos por extrusão**



Fonte: Elaborado pela autora, 2015

Na segunda etapa, os *pellets* foram novamente extrudados na mesma extrusora monorosca (AX-Plásticos) para a preparação dos filmes. Na Figura 16 é ilustrado o processo de extrusão dos filmes poliméricos.

**Figura 16: Ilustração do processo de extrusão dos filmes poliméricos**

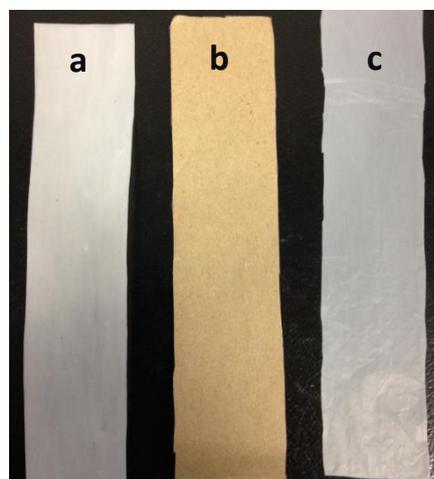


Fonte: Elaborado pela autora, 2015

#### **4.4 Corpos-de-prova**

Os corpos-de-prova foram moldados em dimensões de 150 mm por 25 mm, a partir dos filmes poliméricos desenvolvidos, das sacolas de papel kraft e das sacolas de polietileno de alta densidade, segundo a ASTM D-882 (2012). Alguns dos corpos-de-prova podem ser visualizados na Figura 17.

**Figura 17: Ilustração de alguns corpos-de-prova: a) filmes desenvolvidos b) sacola de papel kraft c) sacola de polietileno de alta densidade**



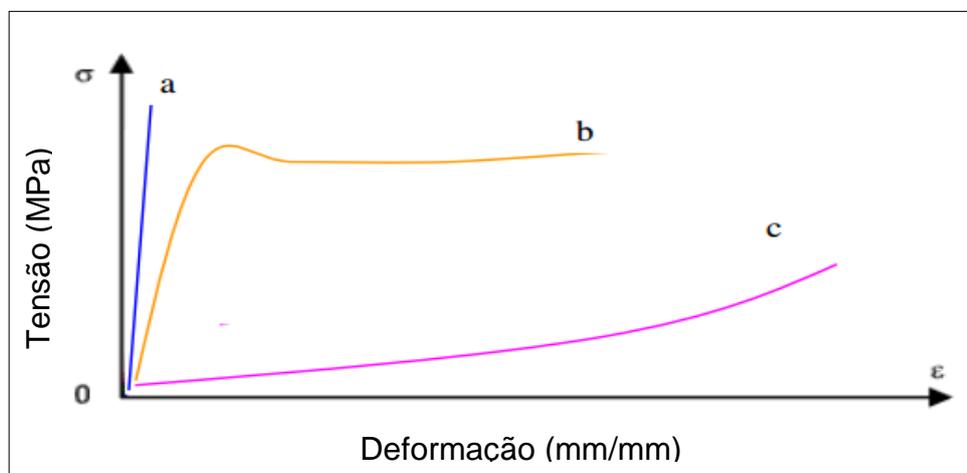
Fonte: Elaborado pela autora, 2015

#### 4.5 Ensaio mecânicos

O ensaio mecânico de tração é amplamente utilizado para o levantamento de informações básicas sobre a resistência dos materiais. O ensaio consiste em submeter o corpo-de-prova a um esforço que tende a alongá-lo até a sua ruptura.

São encontrados três tipos de comportamento para os materiais, conforme apresentado na Figura 18.

**Figura 18: Curvas do comportamento tensão *versus* deformação dos materiais: a) frágeis; b) plásticos; c) elastômeros**



Fonte: Adaptado de CALLISTER, 2008

A curva **a** corresponde à curva de tensão *versus* deformação de um material frágil, que sofre fratura enquanto se deforma na fase elástica. A curva **b** apresenta uma deformação elástica seguida de deformação plástica. Por outro lado, a curva **c** apresenta um comportamento totalmente elástico (CALLISTER, 2008). Um material é dito ter comportamento elástico se, uma vez removido o esforço, as dimensões retornam àquelas antes da aplicação do mesmo, isto é, não há deformações permanentes.

Para realização dos ensaios mecânicos de tração foi utilizada em uma Máquina Universal da marca INSTRON, modelo 5569, para determinar a resistência máxima à tração ( $\sigma$ ), alongamento na ruptura ( $\epsilon$ ) e módulo de Young ( $E$ ) dos filmes poliméricos desenvolvidos, da sacola de papel kraft e da sacola de polietileno de alta densidade.

Os ensaios foram realizados de acordo com a ASTM D-882 (2012), utilizando célula de carga de 1 quilo Newton (kN) e distância inicial entre as garras de 100 mm.

A velocidade utilizada no ensaio para os filmes poliméricos e sacola de PEAD foi de 50 mm/min, já para a sacola de papel kraft a velocidade do ensaio foi de 5 mm/min, por se tratar de um material mais frágil que os demais.

#### 4.6 Análise Termogravimétrica (TGA)

A Análise Termogravimétrica (TGA) é uma técnica utilizada para se monitorar a variação de massa de uma amostra em função da temperatura ou do tempo enquanto a amostra é submetida a uma programação controlada de temperatura. Essa análise apresenta as alterações que o aquecimento pode provocar na massa das amostras, permitindo estabelecer as faixas de temperatura em que elas, por exemplo, começam a se decompor.

Na realização da análise, foi utilizado o equipamento termogravimétrico Mettler Toledo TGA, modelo TGA/SDTA851e, utilizando temperatura de 50 °C a 550 °C e uma taxa de 10 °C.min<sup>-1</sup>.

#### 4.7 Ângulo de contato

A interação entre uma superfície e um determinado líquido pode ser estudada medindo o  $\theta$  (ângulo de contato) do líquido com a superfície, onde é possível indicar a hidrofobicidade da superfície do material. A Figura 19 apresenta a definição do ângulo de contato.

**Figura 19: Ilustração do significado do ângulo de contato**

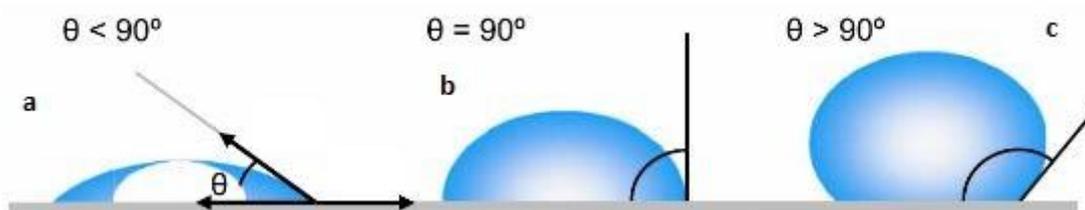


Fonte: Adaptado de PÉROVAL et al, 2002.

A análise do ângulo de contato pode ser utilizada em filmes biodegradáveis para avaliar seu caráter hidrofílico por meio do acompanhamento de sua variação desde o contato inicial até um tempo pré-determinado (ALMEIDA, 2010).

O ângulo de contato determina se o líquido molha o sólido ou não. Quando o ângulo de contato tende a menor que  $90^\circ$ , ocorre uma afinidade química entre a superfície do material e o líquido utilizado no ensaio, ocasionando assim, o espalhamento do líquido no material, indicando uma superfície hidrofílica, conforme apresentado na Figura 20a. Contudo, quando um ângulo de contato é igual a  $90^\circ$  (Figura 20b), indica que o material foi levemente molhado pelo líquido, apresentando característica hidrofóbica. Por outro lado, quando o ângulo de contato tende a maior que  $90^\circ$ , ocorre um caso extremo, onde a superfície do material não apresenta nenhuma afinidade com o líquido, conforme demonstrado na Figura 20c. (YUAN; LEE, 2013; WANG, 2009).

**Figura 20: Ângulo de contato: a)  $\theta < 90^\circ$ , a água é absorvida pelo material; b)  $\theta = 90^\circ$ , a água é parcialmente absorvida; c)  $\theta > 90^\circ$ , a água não é absorvida.**



Fonte: YUAN; LEE, 2013; ALMEIDA, 2010.

A hidrofobicidade das amostras estudadas foi estimada pela medida do ângulo de contato formado por uma gota de água destilada de aproximadamente  $4\mu\text{l}$  no tensiômetro DCAT, modelo Phoenix, com o auxílio de uma seringa. O Ângulo Médio (Average Angle) foi o parâmetro para análise dos resultados.

#### 4.8 Ensaio de sorção

O ensaio de sorção consiste em analisar a variação de massa das amostras, durante o período de imersão em água. Durante o ensaio de sorção, cinco corpos-de-prova de cada amostra foram colocados dentro de um béquer em contato com água destilada e mantidos em temperatura ambiente durante o tempo de ensaio ( $t$ ). As amostras foram retiradas, secas e pesadas a cada intervalo de tempo ( $\Delta t_{\text{medição}}$ ) estabelecido, conforme Tabela 15.

**Tabela 15: Intervalos de tempo para o ensaio de sorção**

$\Delta t_{\text{medição}}$	0	1 min	10 min	60 min	24 h	7 dias
Tempo Total	0	10 min	60 min	24 h	7 dias	14 dias

Fonte: Elaborado pela autora, 2016

O cálculo do coeficiente angular da reta foi calculado através da regressão linear entre a massa de solução sorvida (em gramas) e a raiz quadrada do tempo (em horas), para determinar o coeficiente da quantidade de água absorvida pelo tempo.

#### 4.9 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

A análise morfológica dos polímeros é importante para completar o entendimento do comportamento químico, físico e estrutural do material. A Microscopia Eletrônica de Varredura é uma técnica muito utilizada para observar mudanças morfológicas de blendas poliméricas (MORAES, 2004).

A morfologia das amostras nos dá uma ideia da interação entre os polímeros, e nessa dissertação da interação entre o material biodegradável e o Carbonato de Cálcio. A análise foi realizada utilizando um Microscópio Eletrônico de Varredura compacto da marca JEOL, modelo JSM-6010LA. Os corpos-de-prova foram criofraturados após imersão por 10 minutos em nitrogênio líquido e uma fina camada de ouro foi depositada sobre as amostras, utilizando-se um metalizador.

#### 4.10 Avaliação da biodegradação em solo simulado

O ensaio de biodegradação das amostras foi realizado em solo, onde é simulado um ambiente favorável ao crescimento de micro-organismos responsáveis pelo processo de biodegradação. O solo simulado utilizado no ensaio de biodegradação foi preparado misturando-se 23% de areia, 23% de terra vegetal, 23% de matéria orgânica (11,5% folha seca e 11,5% borra de café) e 31% de água destilada (todos os % em massa). Nessa mistura foi adicionado o adubo NPK 04 14 08 da marca West Garden. Os componentes foram homogeneizados e colocados em bandejas de plástico, conforme ilustrado na Figura 21.

**Figura 21: Ilustração das bandejas contendo solo simulado**



Fonte: Elaborado pela autora, 2015

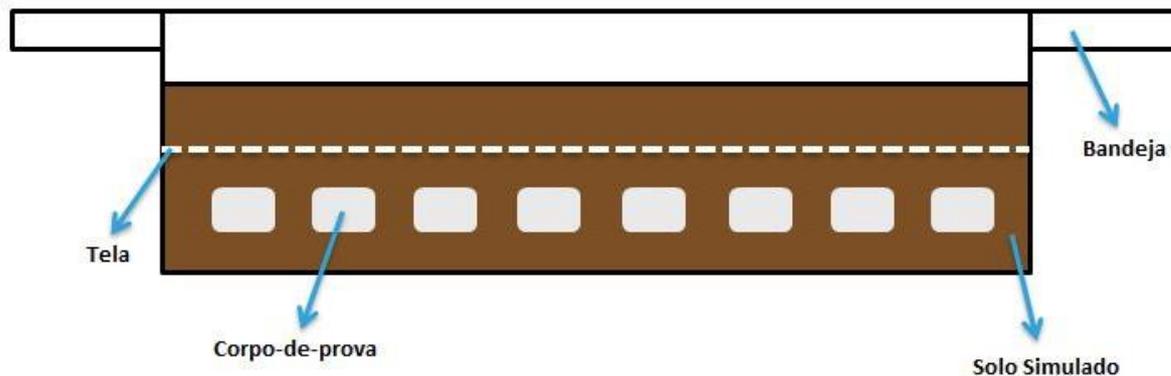
Para cada amostra analisada, foram enterrados 21 corpos-de-prova nas bandejas contendo o solo simulado previamente distribuídos, conforme ilustrado nas Figura 22 e 23.

**Figura 22: Ilustração de alguns corpos-de-prova em bandejas contendo solo simulado**



Fonte: Elaborado pela autora, 2015

**Figura 23: Esquema de disposição das amostras em solo simulado**



Fonte: Elaborado pela autora, 2016

Posteriormente, as bandejas foram armazenadas em prateleiras com ausência de luz e mantidas a temperatura ambiente de aproximadamente 22°C. Para determinação da biodegradabilidade, calcula-se a variação de massa das amostras, conforme demonstrado na Equação 2.

$$\text{Perda de Massa (\%)} = \frac{M_i - M_f}{M_i} \times 100 \quad (\text{Equação 2})$$

As amostras foram retiradas quinzenalmente até completar o período de 60 dias e, em seguida, as retiradas foram feitas mensalmente até completar um ano de ensaio. A cada retirada, as amostras foram secas a temperatura ambiente, pesadas em balança analítica marca TECNAL e colocadas novamente no solo simulado.

#### 4.11 Análise do solo simulado

Alguns parâmetros foram analisados e determinados no solo simulado do ensaio de biodegradação, para verificar a possibilidade de desenvolvimento e crescimento de micro-organismos, que são extremamente importantes para o processo de biodegradação. Esses parâmetros são: pH, teor de umidade, teor de matéria orgânica, percentual de carbono, percentual de nitrogênio e relação C/N.

#### 4.11.1 Determinação do pH

Para determinar o pH, foi pesado 5 gramas do solo simulado e transferiu-se esta quantidade para um béquer de 100 ml, no qual foram adicionados 50 ml de água destilada. Após agitação, em agitador magnético, por 10 minutos, o conjunto foi deixado em repouso por 40 minutos e agitado novamente por mais 10 minutos (ROSA; PANTANO FILHO, 2003). Foram realizadas 2 leituras de pH enquanto a mistura era agitada, utilizando-se um potenciômetro da marca Tecnoyon, modelo mpa210.

#### 4.11.2 Determinação do teor de umidade

Para determinar o teor de umidade, foi pesado 5 gramas do solo simulado de cada bandeja em cadinhos de porcelana. Em seguida, o material foi levado à estufa em uma temperatura de 100-110°C, por um período de 2 horas, para retirada da água (ROSA; PANTANO FILHO, 2003).

O resultado do teor de umidade foi obtido através da Equação 3.

$$\frac{(G1-G2)x 100}{M} \quad \text{Equação (3)}$$

Na equação apresentada, G1 é a massa do cadinho mais massa da amostra úmida, G2 é a massa do cadinho mais amostra após aquecimento e M é a massa inicial da amostra.

#### 4.11.3 Determinação do teor de matéria orgânica

Para a determinação do teor de matéria orgânica, foi utilizado o mesmo material contido no cadinho para a determinação do teor de umidade. Esse material foi levado à mufla a 550°C e a amostra foi aquecida lentamente, de modo a ser queimada sem inflamar e mantida nessa temperatura por aproximadamente uma hora. Posteriormente, o cadinho foi resfriado em dessecador e pesado (ROSA; PANTANO FILHO, 2003). O resultado do teor de matéria orgânica foi obtido através da Equação 4.

$$\frac{(G2-G3)X100}{M} \quad \text{Equação (4)}$$

Nessa equação, G2 é a massa do cadinho mais amostra seca a 100 -110°C; G3 é a massa do cadinho mais cinzas a 550°C e M é a massa inicial das amostras.

#### 4.11.4 Determinação do percentual de carbono total

O percentual de carbono total foi determinado pela divisão do valor de matéria orgânica pelo fator 1,8.

#### 4.11.5 Determinação do percentual de nitrogênio total

Para determinação do teor de nitrogênio total no solo simulado, foi utilizado o método Kjeldahl. A metodologia foi desenvolvida em 1883 por Johan Kjeldahl e se tornou referência para determinação de nitrogênio total (PARRON; MUNIZ; PEREIRA, 2011). É composta por quatro fases: digestão, destilação, titulação e cálculo.

Durante o processo de reação da digestão, o carbono contido na matéria orgânica é transformado em dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) e hidrogênio em água (H<sub>2</sub>O).

Além dos agrupamentos proteicos, existe o nitrogênio sob a forma de amina, amida e nitrila, que é transformado em amônia (NH<sub>3</sub>), a qual reage com o H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, formando o sulfato de amônio ((NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>), conforme mostrado na Reação 3.

##### Processo de Digestão:



No processo de destilação, toda a amônia é desprendida formando o borato de amônio (NH<sub>4</sub>H<sub>2</sub>BO<sub>3</sub>). Por fim, ocorre a titulação do borato de amônio com ácido clorídrico (HCl).

Após as três primeiras fases, é realizado o cálculo do nitrogênio total, conforme apresentado na Equação 5.

$$\% N = \frac{(V_{Am} - V_{Br}) \times C \times 14,01 \times 100 \%}{1000 \times M} \quad \text{Equação (5)}$$

Fonte: PARRON; MUNIZ; PEREIRA, 2011

Nessa equação,  $V_{Am}$  é o volume de ácido gasto na titulação da amostra, em ml;  $V_{Br}$  é o volume de ácido gasto na titulação da prova em branco, em ml;  $C$  é a concentração de ácido clorídrico titulante, em mol.L<sup>-1</sup> e  $M$  é a massa de amostra usada, em gramas.

#### **4.11.6 Relação C/N**

Carbono e nitrogênio são essenciais para o processo de biodegradação. O carbono é fonte de energia para os micro-organismos e o nitrogênio para síntese de proteínas. A proporção indicada é de 30/1 para o início do processo, ou seja, são necessárias 30 partes de carbono para cada de nitrogênio.

#### **4.12 Microscopia óptica**

Foram realizadas fotomicrografias para observar as mudanças na superfície das amostras durante o ensaio de biodegradação. As fotomicrografias foram obtidas utilizando um microscópio óptico polarizado da marca Zeiss, modelo Scope A1, em 100X de aumento.

#### **4.13 Análise de Ecoeficiência**

A metodologia utilizada para realização da Análise de Ecoeficiência, foi desenvolvida pela BASF, com a finalidade de avaliar e comparar os aspectos ambientais e potenciais impactos ambientais e econômicos ao longo do ciclo de vida das alternativas analisadas (NSF, 2013). Foi utilizado o software BEST, desenvolvido pela BASF e pela *GreenDelta Berlin*, lançado em 2013. O software inclui dados das bases de dados de ACV *Boustead* e *Ecoinvent*.

A metodologia de Análise de Ecoeficiência é baseada na série de normas da série ISO 14040 sendo que o objetivo, função, unidade funcional, as fronteiras do estudo, abordagem e fluxograma do sistema de produto estão discriminadas nos itens 4.13.1-4.13.5.

#### 4.13.1 Objetivo

Avaliar o desempenho ambiental e econômico de tecnologias que desempenhem a função de produzir sacolas descartáveis para supermercado.

#### 4.13.2 Função e Unidade Funcional

A função é a definição das características que o sistema estudado irá desempenhar, sendo assim, a função do presente estudo foi produzir, utilizar e destinar sacolas descartáveis.

Unidade Funcional (UF) é quantificação adotada, de acordo com sua função, para utilizar como unidade de referência no estudo. A UF foi definida a partir do número de alunos matriculados em uma universidade na cidade de Santo André, no ano de 2015, sendo 3.688 alunos no período matutino e 4.699 no período noturno. Foi considerado que todos esses alunos utilizam o supermercado próximo à universidade e levou-se em consideração o consumo médio de 66 sacolas por aluno por mês, conforme representado na Tabela 16.

**Tabela 16: Considerações estabelecidas para a determinação da Unidade Funcional (UF) do estudo**

<b>Local</b>	<b>Alunos matriculados</b>	<b>Consumo de sacolas/aluno/mês</b>	<b>Período</b>	<b>UF</b>
Santo André	8.387	66	12 meses	<b>6.642.504 sacolas</b>

Fonte: Elaborado pela autora, 2016

#### 4.13.3 Fronteiras do estudo

A fronteira temporal utilizada, ou seja, o intervalo de tempo durante o qual o sistema em estudo foi avaliado, foi o ano de 2015 (considerando doze meses de utilização das sacolas). Tal decisão foi tomada a fim de que pudesse ser levada em consideração a simulação mais próxima da realidade, no contexto proposto.

Em relação à fronteira geográfica definiu-se a área na qual o sistema está inserido e na qual foi estudado. Para as amostras  $S_{KRAFT}$  e  $S_{PEAD}$ , foi definida a

fronteira geográfica Brasil (para as fases de produção, transporte, processamento e disposição final das alternativas em estudo) e para as amostras representadas pelos filmes poliméricos desenvolvidos, foram considerados os países Brasil (para as fases de produção, transporte, processamento e disposição final das alternativas em estudo) e Alemanha (para produção e transporte das matérias-primas PBAT e material denominado “E”).

#### **4.13.4 Abordagem**

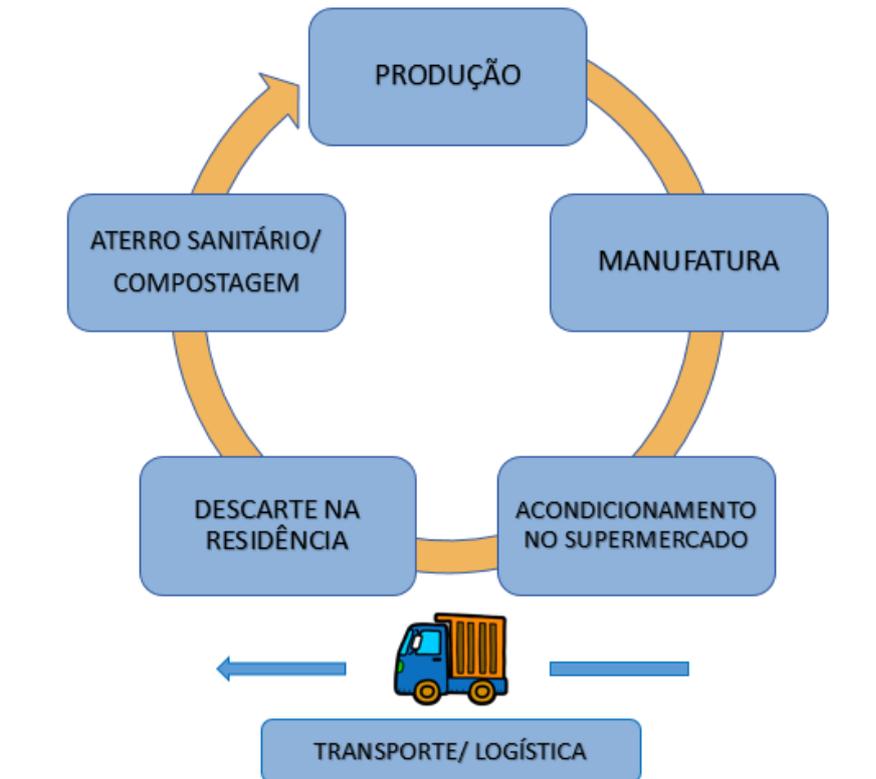
A abordagem adotada foi do “berço ao berço”, onde o ciclo se inicia na extração das matérias-primas e se encerra na destinação final, inserindo os produtos em um novo processo, fechando o ciclo produtivo das sacolas descartáveis.

#### **4.13.5 Fluxograma do Sistema de Produto**

Segundo Silva e Oliveira (2014), o fluxograma é uma representação gráfica de todos os processos relevantes envolvidos no ciclo de vida do sistema de produto estudado. Os retângulos representam os processos elementares e as setas representam os fluxos de matéria ou fluxos de energia.

A Figura 24 mostra o fluxograma com as fases envolvidas no ciclo de vida das alternativas analisadas.

**Figura 24: Fases envolvidas no ciclo de vida de todas as alternativas analisadas**



Fonte: Elaborado pela autora, 2016

#### 4.14 Fases do processo na condução da Análise de Ecoeficiência

Inicialmente, foi necessário o conhecimento dos processos envolvidos no ciclo de vida das alternativas, através de coleta de dados e revisão bibliográfica.

Após o entendimento dos processos produtivos, matérias-primas utilizadas, custos e transportes envolvidos e informações referentes à disposição final das sacolas, foram selecionados os inventários de ciclo de vida disponíveis em bases de dados de Avaliação de Ciclo de Vida, internacionalmente reconhecidas (*Boustead* 5.11, *Ecoinvent* versão 2.2 e base de dados da Fundação Espaço ECO®), cujas tecnologias melhor representassem os processos em avaliação. Quando necessário, foram feitas as devidas adaptações para que os inventários representassem com a maior fidelidade possível os processos produtivos das localidades de origem, para matérias-primas, utilidades e transportes.

#### 4.14.1 Fase de Produção

Nessa fase, foram consideradas as produções das matérias-primas necessárias, de acordo com cada sacola descartável manufaturada. Na Tabela 17 estão apresentadas as matérias-primas necessárias para cada sacola, que foram selecionadas na base de dados *Ecoinvent* versão 2.2

**Tabela 17: Matérias-primas necessárias para cada sacola manufaturada**

<b>Sacola manufatura</b>	<b>Matérias-primas necessárias</b>
E <sub>60</sub> P <sub>40</sub> C <sub>0</sub>	Polímeros e aditivos utilizados no material “E”
E <sub>60</sub> P <sub>30</sub> C <sub>10</sub>	Polímeros e aditivos utilizados no material “E” + Carbonato de Cálcio
E <sub>60</sub> P <sub>20</sub> C <sub>20</sub>	Polímeros e aditivos utilizados no material “E” + Carbonato de Cálcio
E <sub>70</sub> P <sub>20</sub> C <sub>10</sub>	Polímeros e aditivos utilizados no material “E” + Carbonato de Cálcio
E <sub>70</sub> P <sub>15</sub> C <sub>15</sub>	Polímeros e aditivos utilizados no material “E” + Carbonato de Cálcio
S <sub>KRAFT</sub>	Papel kraft
S <sub>PEAD</sub>	Polietileno de alta densidade (PEAD)

Fonte: Elaborado pela autora, 2016

##### 4.14.1.1 Papel kraft

As sacolas de papel kraft não são frequentemente disponibilizadas nos supermercados do Brasil, porém, estão disponíveis em algumas outras lojas de varejo.

Na fase de produção da amostra S<sub>KRAFT</sub>, foi considerada a produção da matéria-prima, ou seja, a produção do papel kraft, conforme mencionado anteriormente. Em seguida à produção dos papéis, esses são disponibilizados em rolos para a indústria de manufatura da sacola de papel.

Para avaliação dos aspectos e potenciais impactos ambientais da amostra S<sub>KRAFT</sub>, foi considerado que a unidade da sacola de papel kraft pesa 9,74 gramas. Portanto, para a produção de 6.642.504 sacolas descartáveis (Unidade Funcional), os impactos ambientais na fase de produção foram calculados para 64.706 kg de papel kraft/UF. Do ponto de vista da avaliação dos impactos econômicos, após orçamentos, foi estabelecido o preço da unidade da sacola de papel kraft em R\$ 0,072, totalizando assim o custo de R\$ 478.260,29/UF, onde estão inclusos os custos de produção, os impostos, a margem de lucro e as despesas necessárias para colocar o produto no estabelecimento.

Foram selecionados da base de dados de Avaliação do Ciclo de Vida *Ecoinvent* versão 2.2, os inventários de ciclo de vida: *sulfate pulp unbleached* (produção do berço ao portão da polpa de celulose, ou seja, desde a extração da matéria-prima até o produto no portão da fábrica) e *kraft paper unbleached* (produção, portão ao portão, das bobinas de papel kraft) os quais, combinados nas devidas proporções, correspondem ao inventário relativo à produção de 1kg de bobina de papel kraft não branqueado, o qual pode ser visualizado no ANEXO A.

#### **4.14.1.2 Polietileno de Alta Densidade (PEAD)**

As sacolas de PEAD são utilizadas atualmente no supermercado analisado na cidade de Santo André e na maioria dos supermercados do Brasil.

Na fase de produção da amostra S<sub>PEAD</sub>, foi considerada a produção da matéria-prima polietileno de alta densidade, sendo que após a sua produção, a resina de polietileno é enviada em forma de *pellets* para as empresas que fazem a manufatura das sacolas.

A unidade da sacola de PEAD estudada pesa 3,032 gramas e custa R\$ 0,059 ao supermercado (preço), portanto, para avaliação dos aspectos e potenciais impactos ambientais foi estabelecido o uso de 20.139 kg de PEAD por UF e para avaliação dos impactos econômicos foi utilizado o custo total de R\$ 390.911,36/ UF, onde também estão inclusos os custos de produção, os impostos, a margem de lucro e as despesas necessárias para colocar o produto no estabelecimento.

Para representação da produção de polietileno de alta densidade, foi utilizado o inventário de ciclo de vida *polyethylene at production* (produção berço ao portão do polietileno de alta densidade), da base de dados *Ecoinvent* versão 2.2,

correspondente aos aspectos ambientais relativos à produção de 1 kg de PEAD. Seu inventário é apresentado no ANEXO B.

#### 4.14.1.3 Polímeros biodegradáveis

Na fase de produção das sacolas manufaturadas com polímeros biodegradáveis, também foram consideradas as produções das matérias-primas, nesse caso, o polímero PBAT e a mistura de polímeros e aditivos, representada pelo material “E”.

Para avaliação dos aspectos e potenciais impactos ambientais das sacolas manufaturadas com os filmes poliméricos desenvolvidos, foi adotada a mesma massa das sacolas de PEAD, 3,032 gramas por unidade de sacola, totalizando 20.139 kg/UF.

Para avaliação dos impactos econômicos, os custos totais variaram de acordo com a incorporação do Carbonato de Cálcio na amostra. A Tabela 18 apresenta o preço final de venda da unidade da sacola ao supermercado.

**Tabela 18: Preço final da unidade da sacola em R\$**

<b>Preço da unidade da sacola em R\$</b>	<b>E<sub>60</sub>P<sub>40</sub>C<sub>0</sub></b>	<b>E<sub>60</sub>P<sub>30</sub>C<sub>10</sub></b>	<b>E<sub>60</sub>P<sub>20</sub>C<sub>20</sub></b>	<b>E<sub>70</sub>P<sub>20</sub>C<sub>10</sub></b>	<b>E<sub>70</sub>P<sub>15</sub>C<sub>15</sub></b>
	0,1440	0,1296	0,1152	0,1296	0,1224

Fonte: Elaborado pela autora, 2016

Contudo, por se tratarem de polímeros com inventários de ciclo de vida confidenciais na base de dados de Avaliação do Ciclo de Vida (dados proprietários da empresa fornecedora das matérias-primas), seus aspectos e potenciais impactos ambientais não serão apresentados individualmente nos anexos, mas de forma consolidada nos inventários resultantes.

#### 4.14.1.4 Carbonato de Cálcio (CaCO<sub>3</sub>)

As amostras E<sub>60</sub>P<sub>30</sub>C<sub>10</sub>, E<sub>60</sub>P<sub>20</sub>C<sub>20</sub>, E<sub>70</sub>P<sub>20</sub>C<sub>10</sub> e E<sub>70</sub>P<sub>15</sub>C<sub>15</sub>, são representadas pelas sacolas de polímeros biodegradáveis com incorporação de CaCO<sub>3</sub>.

Na fase de produção dessas amostras, foi considerada a produção da matéria-prima Carbonato de Cálcio, onde após a sua produção, a carga mineral é encaminhada em forma de pó para as empresas que fazem a manufatura das sacolas.

A Tabela 19 apresenta a quantidade de  $\text{CaCO}_3$  necessária para produção de cada amostra de sacola analisada, no atendimento à função e UF do estudo.

**Tabela 19: Quantidade necessária de  $\text{CaCO}_3$  por amostra, em kg/UF**

Amostras $\text{CaCO}_3$ em kg/UF	E <sub>60</sub> P <sub>40</sub> C <sub>0</sub>	E <sub>60</sub> P <sub>30</sub> C <sub>10</sub>	E <sub>60</sub> P <sub>20</sub> C <sub>20</sub>	E <sub>70</sub> P <sub>20</sub> C <sub>10</sub>	E <sub>70</sub> P <sub>15</sub> C <sub>15</sub>
	0	2.014	4.028	2.014	3.021

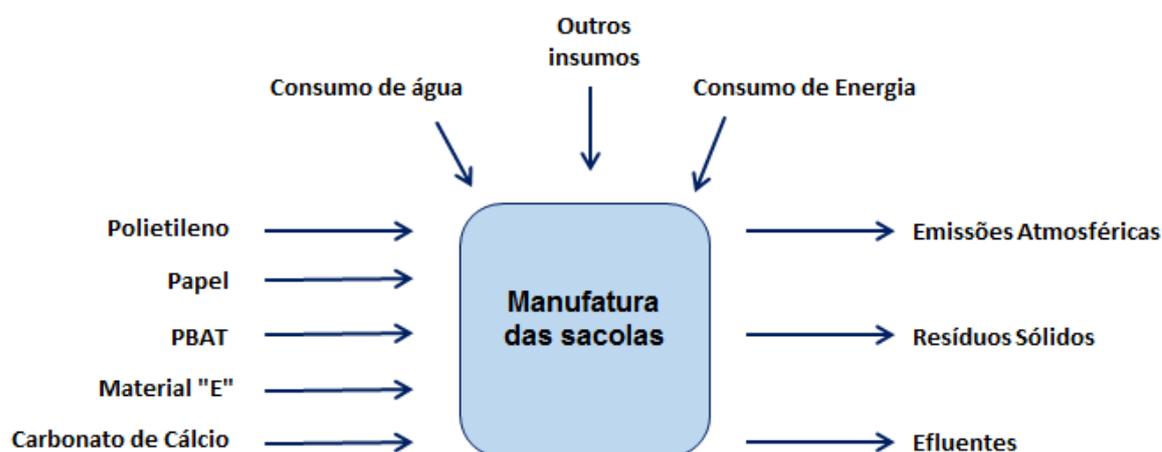
Fonte: Elaborado pela autora, 2016

Para representação da produção de Carbonato de Cálcio, foi selecionado da base de dados *Ecoinvent* versão 2.2, o inventário de ciclo de vida *Limestone drying*, apresentado no ANEXO C, que corresponde aos estágios de extração, processamento (moagem) e secagem, com uma abordagem berço ao portão.

#### 4.14.2 Fase de Manufatura

A manufatura descreve a transformação das matérias-primas em produtos terminados para sua comercialização. A Figura 25 apresenta o processo de manufatura considerado no estudo para produção das sacolas descartáveis.

**Figura 25: Processo de manufatura das sacolas descartáveis**



Fonte: Elaborado pela autora, 2016

Os inventários de ciclo de vida para os processos de Manufatura considerados no estudo também foram adquiridos na base de dados *Ecoinvent* versão 2.2, considerando as tecnologias que melhor os representassem.

#### **4.14.2.1 Manufatura da sacola de papel kraft**

Para o processo de manufatura da sacola de papel kraft, os aspectos e potenciais impactos ambientais avaliados foram decorrentes do inventário de ciclo de vida *paper bag* (produção da sacola de papel, abordagem berço ao portão), excluindo a entrada do inventário *ink* (produção de tinta de impressão, abordagem berço ao portão). Portanto, a combinação desses inventários resultou-se na manufatura de 1 kg de sacola de papel sem impressão (premissa considerada para todas as alternativas em comparação) e pode ser visualizada no ANEXO D.

#### **4.14.2.2 Manufatura da sacola de polietileno de alta densidade**

Para o processo de manufatura da sacola de polietileno de alta densidade, os impactos avaliados foram decorrentes do inventário *plastic bag*, disponível na base de dados *Ecoinvent* versão 2.2, que apresenta os aspectos e potenciais impactos ambientais decorrentes da extrusão de uma sacola plástica. O inventário é apresentado no ANEXO E.

#### **4.14.2.3 Manufatura das sacolas com polímeros biodegradáveis**

Para a manufatura das sacolas manufaturas com polímeros biodegradáveis, foi empregado o mesmo inventário utilizado na alternativa sacola de polietileno de alta densidade, o inventário *plastic bag*, em função da similaridade entre seus processos de manufatura.

#### **4.14.3 Fase de Acondicionamento no Supermercado**

Com base na média de consumo de sacola por brasileiro, foi considerado nessa fase que cada aluno utilizou em média 66 sacolas descartáveis por mês, para acondicionamento de suas compras realizadas no supermercado.

Por não haver impactos ambientais e econômicos consequentes da ação de acondicionar compras em sacolas descartáveis, não houve avaliação de impactos nessa fase. Foram calculados somente os impactos ambientais e econômicos causados no transporte da indústria manufatureira até o supermercado e, em seguida, do supermercado até a residência, conforme abordado em detalhes no item 4.14.6.

#### **4.14.4 Fase de Descarte na Residência**

Por se tratar de um hábito comum das pessoas, a análise considerou que após os alunos retirarem as compras das sacolas descartáveis, essas foram reutilizadas nas residências, para descarte dos resíduos sólidos domésticos.

Também não houve avaliação de impactos ambientais e econômicos decorrentes da prática realizada nessa fase. Apenas foram calculados os impactos ambientais e econômicos derivados do transporte do supermercado até a residência e, posteriormente, da residência até o local de destinação final, abordados no item 4.14.6.

#### **4.14.5 Fase de Destinação Final**

A fase de Destinação Final avaliou o último estágio do ciclo de vida das alternativas analisadas, dividindo-se em Aterro Sanitário e Compostagem. Nessa fase foi considerado que todos os alunos destinam os resíduos sólidos orgânicos juntamente com as sacolas descartáveis.

No caso das sacolas manufaturadas com os polímeros biodegradáveis, sem ou com incorporação de Carbonato de Cálcio, foi considerado que as mesmas acondicionaram os resíduos sólidos orgânicos e foram encaminhadas para o processo de compostagem. Enquanto que para as sacolas manufaturadas com papel kraft e com polietileno de alta densidade, foi considerada a destinação conjunta da sacola com os resíduos sólidos orgânicos para o aterro sanitário.

Deste modo, considerando que cada brasileiro gera por ano 387,63 kg de resíduos sólidos e que desses resíduos gerados 51,4% é constituído de matéria orgânica, estabeleceu-se que todos os 8.387 alunos geram 1.671.041 kg de resíduos sólidos orgânicos, que são acondicionados nas sacolas descartáveis para serem encaminhados em conjunto para o aterro sanitário ou ao processo de compostagem.

Na Tabela 20 estão descritas as quantidades de sacolas descartáveis e de resíduos sólidos orgânicos que são encaminhados para os dois tipos de destinação final de acordo com a Unidade Funcional.

**Tabela 20: Quantidade de sacolas descartáveis e de resíduos sólidos orgânicos por Unidade Funcional encaminhados à destinação final**

<b>Amostras</b>	<b>Quantidade de sacolas em kg/UF</b>	<b>Quantidade de resíduos sólidos orgânicos em kg/UF</b>	<b>Destinação Final</b>
E <sub>60</sub> P <sub>40</sub> C <sub>0</sub>	20.139	1.671.041	Compostagem
E <sub>60</sub> P <sub>30</sub> C <sub>10</sub>	20.139	1.671.041	
E <sub>60</sub> P <sub>20</sub> C <sub>20</sub>	20.139	1.671.041	
E <sub>70</sub> P <sub>20</sub> C <sub>10</sub>	20.139	1.671.041	
E <sub>70</sub> P <sub>15</sub> C <sub>15</sub>	20.139	1.671.041	
S <sub>KRAFT</sub>	64.706	1.671.041	Aterro Sanitário
S <sub>SPEAD</sub>	20.139	1.671.041	

Fonte: Elaborado pela autora, 2016

#### 4.14.5.1 Compostagem

Para o processo de compostagem dos 1.671.041 kg de resíduos sólidos orgânicos por UF foi utilizado o inventário *composting biowaste*, que apresenta os aspectos e potenciais impactos ambientais para a compostagem de 1kg de resíduo sólido orgânico. Esse inventário de ciclo de vida também considera que para 1kg de resíduo sólido orgânico compostado é gerado o equivalente a 0,015kg de fertilizante orgânico. Portanto, para a compostagem de 1.671.041 kg de resíduos sólidos orgânicos por UF, foram obtidos 25.066 kg de um composto equivalente ao fertilizante orgânico.

Para avaliação dos impactos econômicos, foi considerado que o kg do fertilizante orgânico produzido pela rota tecnológica convencional é vendido por aproximadamente R\$ 0,95. Nesse caso, atendendo os 25.066 kg/UF de composto equivalente ao fertilizante orgânico obtidos por sacola, foi reduzido do custo no ciclo de vida das sacolas manufaturas com polímeros biodegradáveis, o total de R\$ 23.862,47/UF.

Para o processo de compostagem das sacolas manufaturas com polímeros biodegradáveis, foi utilizado um inventário específico para a compostagem de 1kg de sacola produzida com a blenda polimérica PBAT/PLA. Por conta da confidencialidade desse inventário por parte dos fornecedores, seu nome não foi declarado nesse trabalho. Esse inventário também considera a geração de 0,500 de turfa para cada 1kg de sacola compostada. A quantidade gerada de turfa por amostra é apresentada na Tabela 21.

**Tabela 21: Quantidade de turfa gerada por sacola manufaturada com polímeros biodegradáveis**

<b>Amostras</b>	<b>kg de polímero biodegradável</b>	<b>kg de turfa gerada</b>
E <sub>60</sub> P <sub>40</sub> C <sub>0</sub>	20.139	10.070
E <sub>60</sub> P <sub>30</sub> C <sub>10</sub>	18.125	9.063
E <sub>60</sub> P <sub>20</sub> C <sub>20</sub>	16.112	8.056
E <sub>70</sub> C <sub>20</sub> C <sub>10</sub>	18.125	9.063
E <sub>70</sub> P <sub>15</sub> C <sub>15</sub>	17.118	8.559

Fonte: Elaborado pela autora, 2016

A turfa é muito utilizada na agricultura, como um condicionador para melhorar as propriedades físicas do solo e aumentar a atividade microbiana, devido ao teor de matéria orgânica. Foi estabelecido, após orçamentos realizados, o custo de venda de R\$10,00 para 1kg de turfa. A Tabela 22 apresenta a receita total proveniente da venda da turfa obtida por amostra.

**Tabela 22: Receita total proveniente da venda da turfa obtida por amostra**

<b>Amostras</b>	<b>kg de turfa gerada</b>	<b>Custo total da venda de turfa</b>
E <sub>60</sub> P <sub>40</sub> C <sub>0</sub>	10.070	R\$ 100.697,04
E <sub>60</sub> P <sub>30</sub> C <sub>10</sub>	9.063	R\$ 90.627,34
E <sub>60</sub> P <sub>20</sub> C <sub>20</sub>	8.056	R\$ 80.557,63
E <sub>70</sub> C <sub>20</sub> C <sub>10</sub>	9.063	R\$ 90.627,34
E <sub>70</sub> P <sub>15</sub> C <sub>15</sub>	8.559	R\$ 85.592,48

Fonte: Elaborado pela autora, 2016

Estabeleceu-se também, para avaliação dos impactos econômicos, após orçamentos realizados com empresas do setor, o custo de R\$ 55,00 por tonelada de resíduos encaminhada para a compostagem. Sendo assim, para cada amostra analisada, considerando os 21.309 kg/UF de sacolas enviados para a compostagem, o custo total foi de R\$ 1.309,00 e para o envio dos 1.671.041 kg/UF de resíduos orgânicos, o custo total foi de R\$ 91.907,26.

A receita proveniente da venda do fertilizante orgânico e da turfa, foi abatida dos custos totais do ciclo de vida de cada alternativa analisada de sacola manufatura com polímeros biodegradáveis.

#### **4.14.5.2 Aterro Sanitário**

Para avaliação dos impactos econômicos na destinação final das amostras  $S_{KRAFT}$  e  $S_{PEAD}$ , foi estabelecido, após orçamentos com empresas do setor, o custo de R\$ 65,00 por tonelada encaminhada de resíduo para o aterro sanitário.

Portanto, para a amostra  $S_{KRAFT}$  obteve-se um custo total de R\$ 4.205/UF para encaminhar as sacolas e um custo total de R\$ 108.617,00 para encaminhar os resíduos orgânicos. Para a amostra  $S_{PEAD}$  obteve-se o custo total de R\$ 1.309,00/UF para as sacolas de PEAD encaminhadas para o aterro sanitário e um custo total de R\$ 108.617,00 para enviar os resíduos orgânicos.

Para o processo de decomposição no aterro sanitário dos 1.671.041 kg de resíduos sólidos orgânicos por UF, encaminhados juntamente com as sacolas de papel kraft ( $S_{KRAFT}$ ) ou de polietileno de alta densidade ( $S_{PEAD}$ ), foi utilizado o inventário *packaging paper to landfill*, que apresenta os aspectos e potenciais impactos ambientais para a decomposição de 1kg de resíduo sólido orgânico em aterro sanitário.

Na destinação final da amostra  $S_{KRAFT}$  para o aterro sanitário, foi considerado que ocorre uma degradação total do montante de sacolas durante a fronteira temporal de um ano avaliada, onde as sacolas são transformadas em emissões atmosféricas ( $CH_4$  e  $CO_2$ ).

No entanto, para a amostra  $S_{PEAD}$ , foi estabelecido que as sacolas permanecem intactas durante o período determinado no escopo, não existindo emissões atmosféricas ou efluentes. A quantidade de 20.139 kg de sacola de PEAD por UF

permaneceu sob a forma de resíduos sólidos, tendo sido contabilizados dentro da categoria de impacto ambiental de emissões, durante todo o ano avaliado.

#### 4.14.6 Transportes

Os transportes foram determinados para cada estágio considerado no ciclo de vida das alternativas. As distâncias foram calculadas com a utilização do software *Google Maps*, de acordo com os locais considerados para as fases de produção, manufatura, uso e disposição final das sacolas.

Foram selecionados inventários de ciclo de vida da base de dados *Ecoinvent* versão 2.2, que correspondem à realidade do estudo, em conformidade com a capacidade necessária dos meios de transporte. Os inventários utilizados foram: *road transport rigid 3 tonne* (representando veículos com capacidade de carga de 3 toneladas), *road transport rigid 13-20 tonne* (representando veículos com capacidade de carga de 13 a 20 toneladas), *road transport articulated 18-25 tonne* (representando veículos com capacidade de carga de 18 a 25 toneladas) e *sea transport average* (representando os navios).

Os transportes relacionados à fase de produção, foram aqueles provenientes dos locais nos quais estão instaladas as empresas que produzem as matérias-primas, sendo: Ludwigshafen - Alemanha (polímeros biodegradáveis), Cachoeiro de Itapemirim - Espírito Santo (Carbonato de Cálcio), Santo André – SP (polietileno de alta densidade) e Suzano – SP (papel kraft).

Após a produção das matérias-primas, essas foram encaminhadas para as empresas que realizam a manufatura das sacolas, estando instaladas na cidade de São Paulo onde, posteriormente, foram distribuídas para o local de uso (supermercado na cidade de Santo André).

Foi considerado que após a utilização das sacolas para acondicionamento das compras, os alunos percorreram uma distância de 10 km até suas respectivas residências. Depois da reutilização das sacolas nas residências, como embalagens para os resíduos sólidos orgânicos, as sacolas descartáveis foram encaminhadas juntamente com os resíduos para o aterro sanitário de Santo André (amostras SKRAFT e SPEAD) ou para a planta de compostagem em Jundiaí (sacolas manufaturadas com os filmes poliméricos desenvolvidos).

Na avaliação dos impactos econômicos foram considerados os custos com frete, combustíveis, pedágios, salário dos motoristas e manutenção dos meios de transporte, para todas alternativas analisadas.

#### 4.15 Premissas

As premissas são proposições e hipóteses levadas em consideração para que seja possível estabelecer um modelo que represente a realidade de forma a alcançar algum resultado ou conclusão, conforme recomendado pela ABNT NBR ISO 14040:2009. As premissas consideradas no estudo foram:

- Foi considerado que todos os 8.387 alunos utilizam o supermercado próximo à universidade;
- Foi considerada a utilização, em média, de 66 sacolas por mês por aluno;
- Foi considerado que os alunos residem em uma distância média de 10km da universidade;
- A análise desconsiderou a instalação das tecnologias, pois esse processo é semelhante para todas alternativas estudadas;
- A análise desconsiderou os salários dos funcionários que trabalham no supermercado;
- Foram desconsiderados os declínios de sazonalidade de visitação ao supermercado, decorrentes das férias escolares;
- Não foi considerada a perda de materiais na fase de manufatura;
- Foi considerado que os maquinários não se quebram durante o período de um ano (fronteira temporal);
- Foram desconsiderados os *pallets* e os plásticos utilizados para embalagem e movimentação das sacolas, pois o processo é semelhante para as alternativas e se anulam para efeito de comparação;
- Não foi considerada a impressão das sacolas para comercialização;
- Foi considerado que os resíduos sólidos orgânicos foram encaminhados juntamente com as sacolas descartáveis para a destinação final (compostagem e aterro sanitário) e que o restante dos resíduos (recicláveis) foi encaminhado para os ecopontos da cidade.



## 5. RESULTADOS

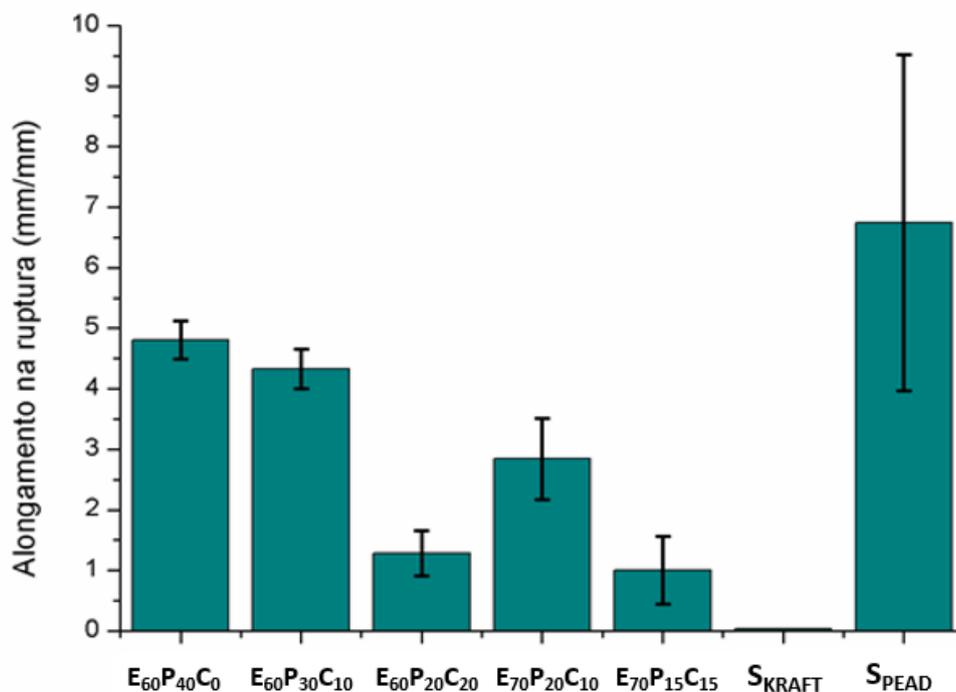
### 5.1 Ensaio mecânico de tração

As amostras foram submetidas ao ensaio mecânico de tração para determinação de suas propriedades, no qual obteve-se os valores de alongamento na ruptura, a resistência máxima à tração e o Módulo de Young dos corpos de prova.

#### 5.1.1 Alongamento na ruptura

A Figura 26 apresenta os valores médios do alongamento na ruptura das amostras e seus respectivos desvios padrão. O alongamento na ruptura representa o aumento percentual do comprimento do corpo de prova sob tração, demonstrando a deformação que o mesmo sofre durante o ensaio.

**Figura 26: Valores médios do alongamento na ruptura e seus respectivos desvios padrão**



Fonte: Elaborado pela autora, 2016

Foram observados nos valores do alongamento na ruptura, dois comportamentos diferentes decorrentes das composições das amostras, relacionados com as variações de quantidades incorporadas de PBAT e de Carbonato de Cálcio. No primeiro comportamento, é observado que dentre as amostras representadas pelos filmes poliméricos desenvolvidos, quanto maior a porcentagem mássica de PBAT, maior é o alongamento na ruptura apresentado pela amostra. Esse efeito também foi observado por Kuchnier (2014) em misturas com porcentagens mássicas semelhantes de PBAT e PLA. Coltelli et al. (2008) atribuem esse comportamento à maior flexibilidade do PBAT comparado ao PLA e que a mistura dos dois materiais reduz a fragilidade original apresentada pela PLA. Yeh et al. (2009) também associam a modificação na fragilidade do PLA como consequência da adição do PBAT.

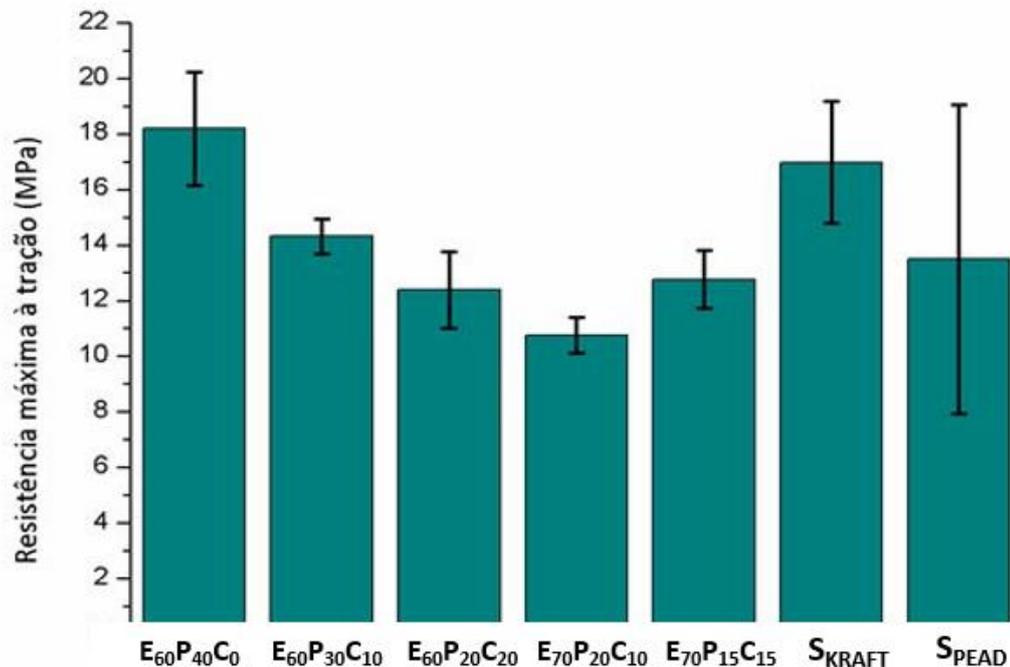
Também é possível observar na Figura 26, que o alongamento na ruptura das amostras diminuiu com a incorporação de Carbonato de Cálcio. Teamsinsungvon; Ruksakulpiwat; Jarukumjorn (2010) também observaram o mesmo comportamento ao incorporarem 5, 10, 20 e 30% de  $\text{CaCO}_3$  em misturas de PBAT com PLA. Esse comportamento pode ser justificado por conta dos concentradores de tensão que o Carbonato de Cálcio causa na blenda polimérica, favorecendo o menor alongamento das cadeias poliméricas na ruptura.

Analisando todas as amostras, é observado que a amostra  $S_{\text{KRAFT}}$  apresentou o menor alongamento na ruptura e a amostra  $S_{\text{PEAD}}$  o maior alongamento na ruptura. Sendo assim, é possível concluir que os filmes poliméricos desenvolvidos apresentaram propriedades intermediárias em comparação com as sacolas já manufaturadas.

### 5.1.2 Resistência máxima à tração

A resistência máxima à tração é a tensão máxima, em MPa, que o material suporta antes de se romper. A Figura 27 apresenta os valores médios da resistência máxima à tração das amostras e seus respectivos desvios padrão.

**Figura 27: Valores médios da resistência máxima à tração e seus respectivos desvios padrão**



Fonte: Elaborado pela autora, 2016

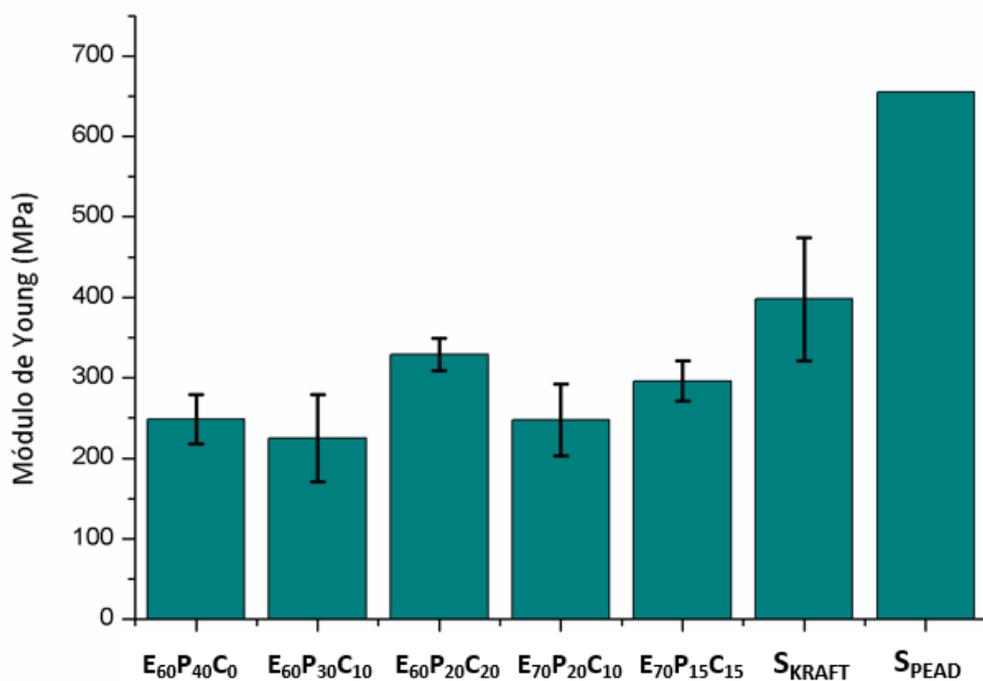
Nas amostras representadas pelos filmes poliméricos desenvolvidos, é possível observar que a resistência à tração diminuiu com a incorporação de  $\text{CaCO}_3$ . O mesmo comportamento foi observado por Miguel (2010), que analisou as propriedades mecânicas do polipropileno com adição de Carbonato de Cálcio e por Teamsinsungvon; Ruksakulpiwat; Jarukumjorn (2010), que analisaram a incorporação de  $\text{CaCO}_3$  em misturas de PBAT com PLA. Segundo Garay (2010), a resistência à tração diminui com a incorporação de Carbonato de Cálcio, visto que a partícula de carga atua como um concentrador de tensão na matriz do compósito.

Também é possível observar na Figura 27, que a amostra S<sub>KRAFT</sub> possui resistência máxima à tração um pouco menor que a amostra E<sub>60</sub>P<sub>40</sub>C<sub>0</sub>, que não possui  $\text{CaCO}_3$ , isto é, uma diferença de 1,21 MPa. Contudo, a amostra S<sub>KRAFT</sub> possui resistência máxima à tração maior que as amostras que possuem incorporação da carga e maior que a amostra S<sub>PEAD</sub>.

### 5.1.3 Módulo de Young

O Módulo de Young é a grandeza proporcional à rigidez de um material quando esse é submetido a uma tensão. Basicamente, é a razão entre a tensão aplicada e a deformação sofrida pelo corpo, quando o comportamento é linear. A Figura 28 apresenta os valores médios do Módulo de Young e seus respectivos desvios padrão.

**Figura 28: Valores médios do Módulo de Young e seus respectivos desvios padrão**



Fonte: Elaborado pela autora, 2016

Na Figura 28 é possível observar que para as amostras E<sub>60</sub>P<sub>30</sub>C<sub>10</sub> e E<sub>70</sub>P<sub>20</sub>C<sub>10</sub>, que possuem baixa concentração de Carbonato de Cálcio, o Módulo de Young manteve-se similar à amostra E<sub>60</sub>P<sub>40</sub>C<sub>0</sub>, que não possui a carga. No entanto, para a amostra E<sub>60</sub>P<sub>20</sub>C<sub>20</sub>, que possui incorporação mássica de 20% de CaCO<sub>3</sub>, foi observado um aumento significativo do Módulo de Young, movendo-se de 248 MPa para 329 MPa.

Teamsinsungvon; Ruksakulpiwat; Jarukumjorn (2010) incorporaram 5, 10, 20 e 30% de Carbonato de Cálcio em misturas de PBAT com PLA e também observaram um aumento no Módulo de Young à medida que a porcentagem mássica da carga aumentava na mistura.

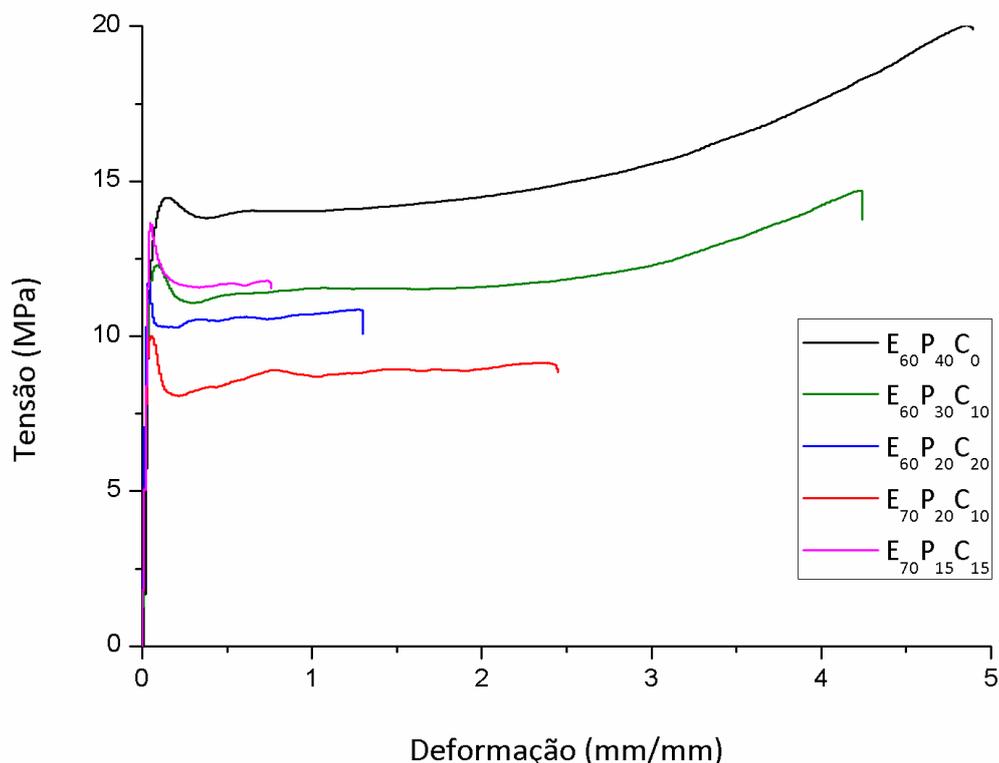
Para representação do Módulo de Young da amostra  $S_{PEAD}$ , foi utilizado como referência o Catálogo de Poliolefinas da Braskem (BRASKEM, 2015). Deste modo, é possível observar na Figura 28, que a amostra  $S_{PEAD}$  possui o maior Módulo de Young, 655 MPa, uma diferença de aproximadamente 257 MPa para a amostra  $S_{KRAFT}$ .

#### 5.1.4 Curvas de tensão *versus* deformação

Através dessas curvas foi possível obter os resultados do alongamento na ruptura, resistência máxima à tração e Módulo de Young.

Na Figura 29 é possível observar as curvas médias de tensão *versus* deformação das amostras representadas pelos filmes poliméricos desenvolvidos.

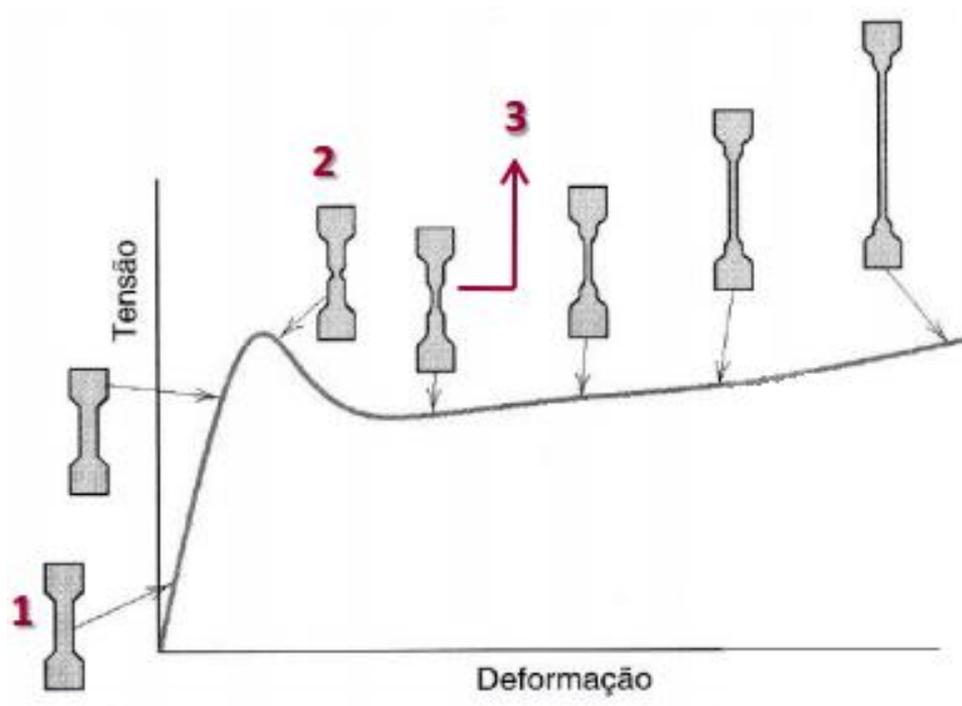
**Figura 29: Curvas médias do ensaio de tração das amostras representadas pelos filmes poliméricos desenvolvidos**



Fonte: Elaborado pela autora, 2016

Observa-se que todas as amostras demonstraram um comportamento de material dúctil, exibindo uma deformação plástica antes da ruptura. Esse mecanismo de deformação é apresentado na Figura 30.

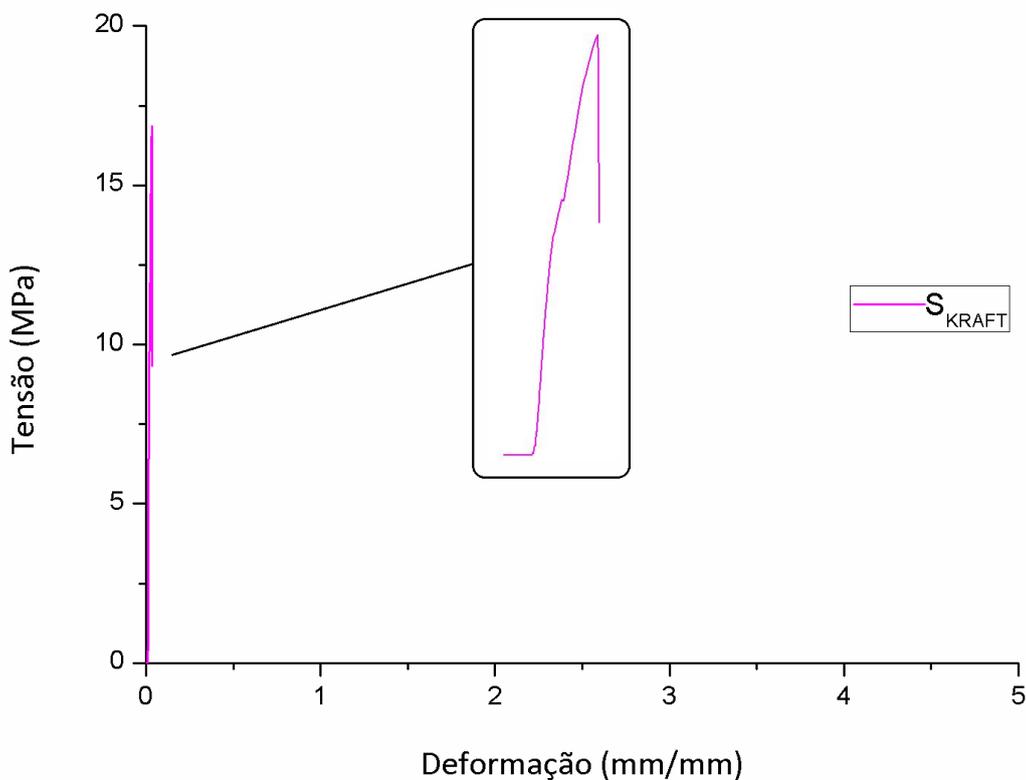
**Figura 30: Exemplo do mecanismo de deformação apresentado pelas amostras representadas pelos filmes poliméricos desenvolvidos**



Fonte: Adaptado de Google Imagens, 2016

Na Figura 30, o 1 corresponde ao corpo-de-prova da amostra no início do ensaio de tração, 2 é referente ao limite de escoamento, onde é encerrada a fase de deformação elástica e um pequeno pescoço é formado no corpo-de-prova e 3 corresponde à continuidade da deformação, onde o alongamento do pescoço prossegue até a ruptura do corpo-de-prova.

Na Figura 31 é apresentada a curva de tensão *versus* deformação da amostra SKRAFT, onde é evidenciado o menor alongamento na ruptura, ou seja, após atingir sua resistência máxima à tração, a amostra se rompe rapidamente, sem demonstrar expressiva deformação plástica, apresentando um comportamento característico de um material frágil.

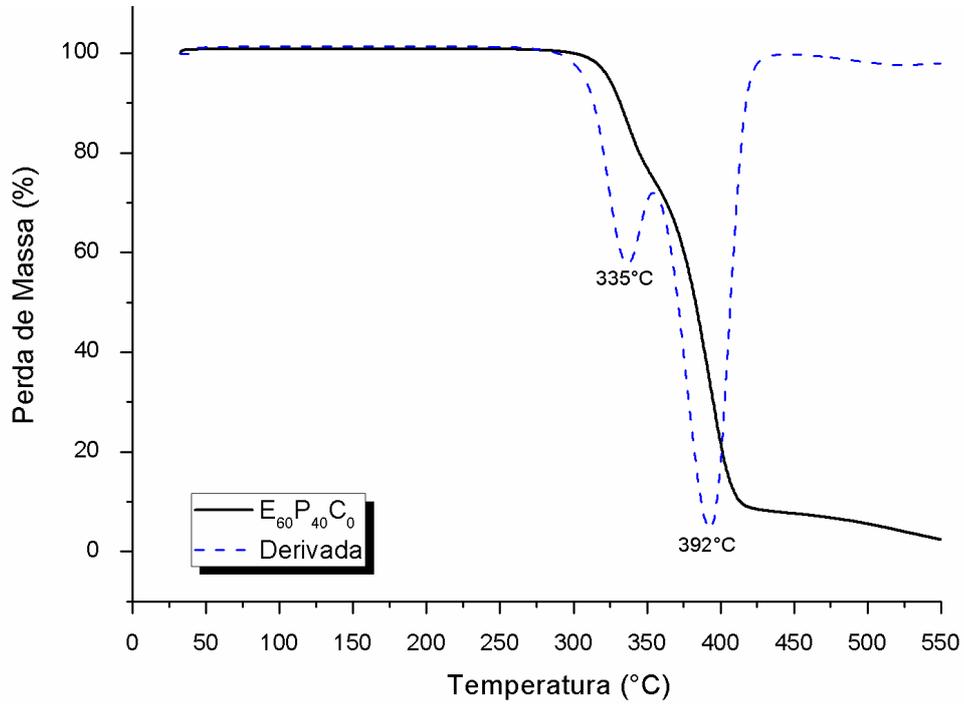
**Figura 31: Curva tensão versus deformação da amostra S<sub>KRAFT</sub>**

Fonte: Elaborado pela autora, 2016

## 5.2 Análise Termogravimétrica (TGA)

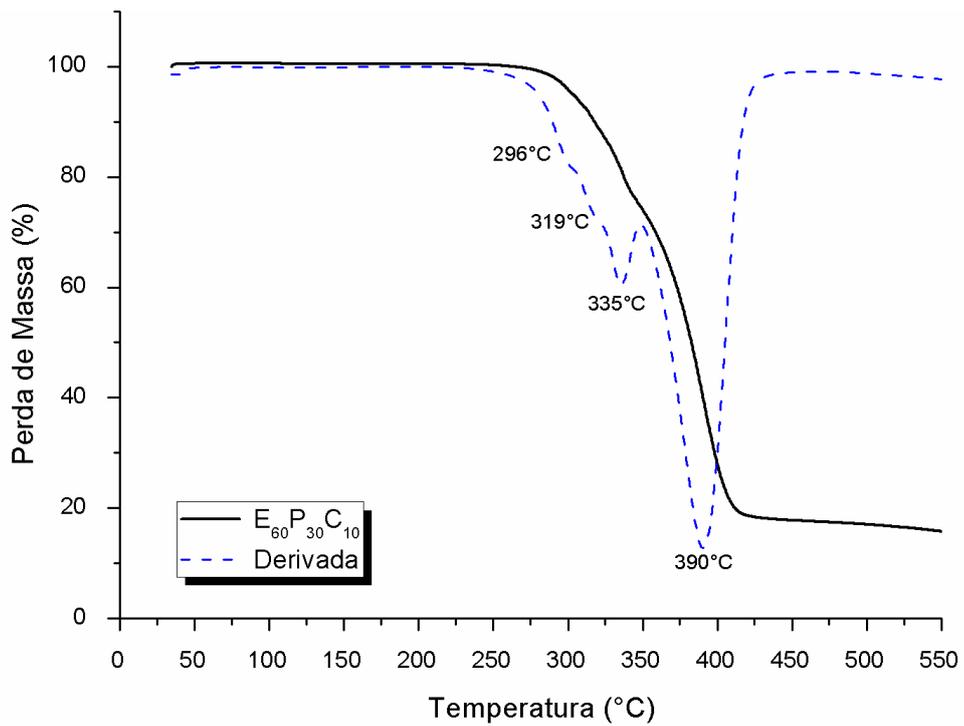
As Figuras 32, 33, 34, 35 e 36 apresentam as perdas de massa e estabilidade térmica das amostras E<sub>60</sub>P<sub>40</sub>C<sub>0</sub>, E<sub>60</sub>P<sub>30</sub>C<sub>10</sub>, E<sub>60</sub>P<sub>20</sub>C<sub>20</sub>, E<sub>70</sub>P<sub>20</sub>C<sub>10</sub> e E<sub>70</sub>P<sub>15</sub>C<sub>15</sub>, respectivamente, através das curvas de TG e de suas derivadas (DTG).

Figura 32: Perda de massa e estabilidade térmica da amostra  $E_{60}P_{40}C_0$



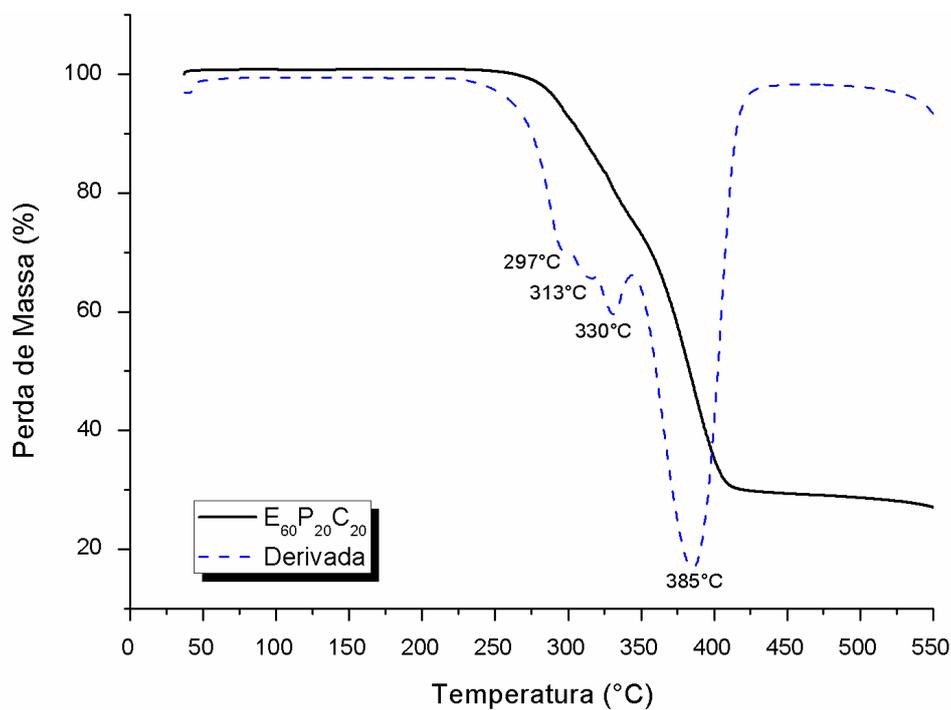
Fonte: Elaborado pela autora, 2016

Figura 33: Perda de massa e estabilidade térmica da amostra  $E_{60}P_{30}C_{10}$



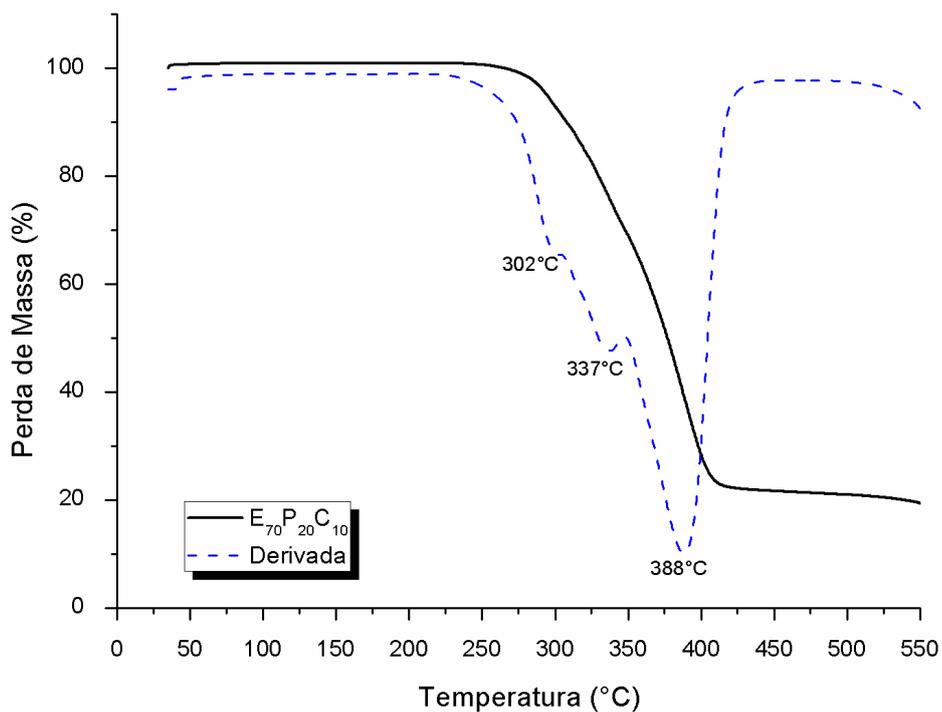
Fonte: Elaborado pela autora, 2016

Figura 34: Perda de massa e estabilidade térmica da amostra E<sub>60</sub>P<sub>20</sub>C<sub>20</sub>



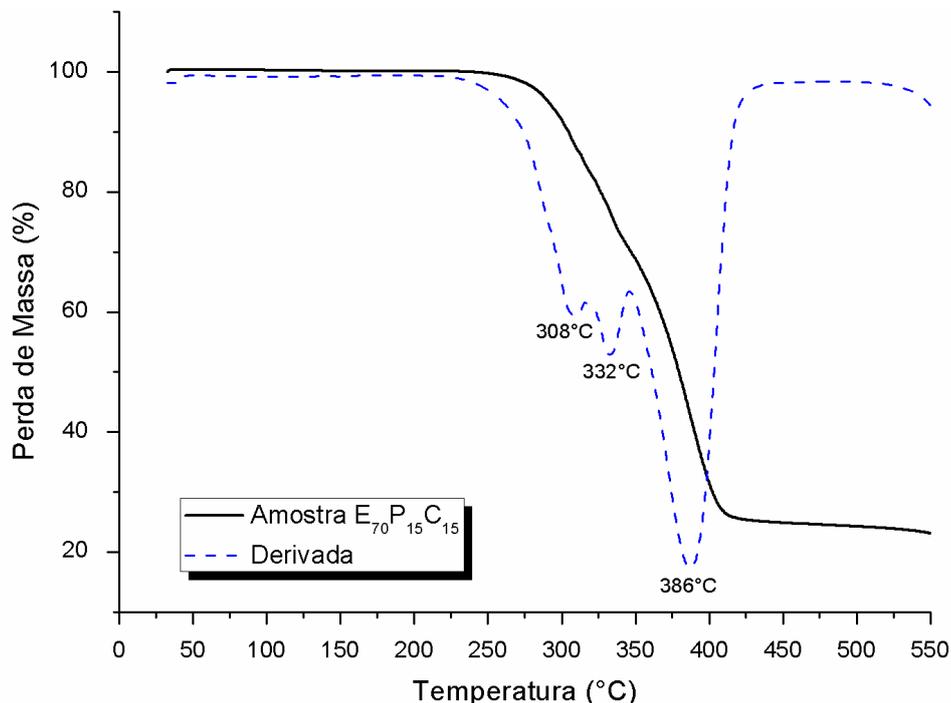
Fonte: Elaborado pela autora, 2016

Figura 35: Perda de massa e estabilidade térmica da amostra E<sub>70</sub>P<sub>20</sub>C<sub>10</sub>



Fonte: Elaborado pela autora, 2016

**Figura 36: Perda de massa e estabilidade térmica da amostra E<sub>70</sub>P<sub>15</sub>C<sub>15</sub>**



Fonte: Elaborado pela autora, 2016

Nas Figuras 32, 33, 34, 35 e 36 é possível observar o início da decomposição térmica das amostras, que foi determinado a T<sub>95</sub>%. Para a amostra E<sub>60</sub>P<sub>40</sub>C<sub>0</sub> é possível observar duas transições de temperatura, correspondentes aos dois polímeros presentes na blenda polimérica PBAT/PLA. A primeira transição a partir de 325°C, representando o PLA (KRISHNAIAH; RATNAM; MANICKAM, 2017), e a segunda transição a 360°C, representando o PBAT (VENKATESAN; RAJESWARI, 2017). Através dos valores das derivadas (DTG), os resultados apontaram a degradação máxima destes polímeros ocorrendo a 337°C (PLA) e 392°C (PBAT).

Também foi observado nas Figuras que as amostras que possuem incorporação do Carbonato de Cálcio, não apresentaram a característica de duas decomposições observada na amostra E<sub>60</sub>P<sub>40</sub>C<sub>0</sub>, demonstrando que a carga favoreceu a interação dos polímeros PLA e PBAT. Essa interação também é apresentada nos resultados da Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV). Por outro lado, é observado nas curvas de DTG, as duas transições na estabilidade térmica das amostras com CaCO<sub>3</sub> e o aparecimento de um terceiro e quarto pico nos valores.

Segundo Essabir et. al. (2017), a primeira decomposição do Carbonato de Cálcio, que produz óxido de cálcio (CaO) e dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), começa somente a cerca de 400 °C. De tal modo, as curvas de decomposições térmicas que aparecem nas Figuras próximas aos 300 °C estão relacionadas a possíveis resíduos orgânicos presentes no Carbonato de Cálcio, decorrentes do processo de mineração. (ESSABIR et. al., 2017; OKHRIMENKO et al., 2014).

Os resultados das curvas de DTG também mostraram que a incorporação de CaCO<sub>3</sub> reduziu a temperatura máxima de taxa de degradação, conforme apresentado na Tabela 23.

**Tabela 23: Temperatura na qual ocorre a máxima degradação**

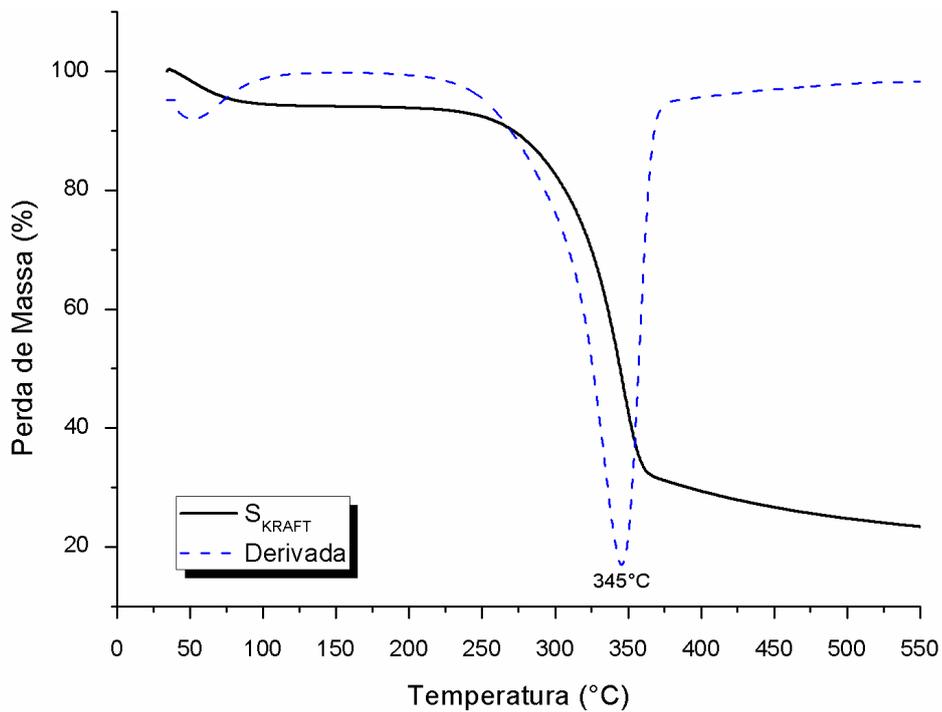
<b>Amostras</b>	<b>Temperatura</b>
E <sub>60</sub> P <sub>40</sub> C <sub>0</sub>	392°C
E <sub>60</sub> P <sub>30</sub> C <sub>10</sub>	390°C
E <sub>60</sub> P <sub>20</sub> C <sub>20</sub>	385°C
E <sub>70</sub> C <sub>20</sub> C <sub>10</sub>	388°C
E <sub>70</sub> P <sub>15</sub> C <sub>15</sub>	386°C

Fonte: Elaborado pela autora, 2016

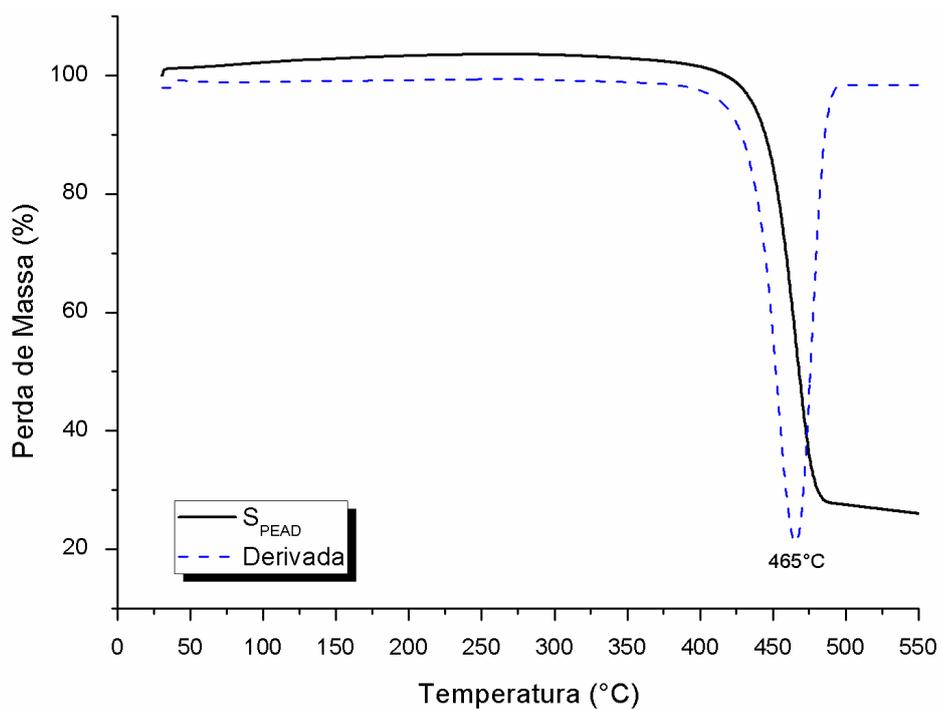
Esse resultado é decorrente do efeito catalítico do CaCO<sub>3</sub> na despolimerização das ligações éster, que regula a decomposição do polímero (TEAMSINSUNGVON; RUKSAKULPIWAT; JARUKUMJORN, 2013).

Além disso, todas as amostras deixaram carvão residual, incluindo a mistura pura, indicando que os polímeros comerciais apresentam alguns aditivos inorgânicos e estabilizantes.

Nas Figuras 37 e 38 é possível observar a perda de massa e a estabilidade térmica das amostras S<sub>KRAFT</sub> e S<sub>SPEAD</sub>, respectivamente, através das curvas de TG e de suas derivadas (DTG).

**Figura 37: Perda de massa e estabilidade térmica da amostra S<sub>KRAFT</sub>**

Fonte: Elaborado pela autora, 2016

**Figura 38: Perda de massa e estabilidade térmica da amostra S<sub>PEAD</sub>**

Fonte: Elaborado pela autora, 2016

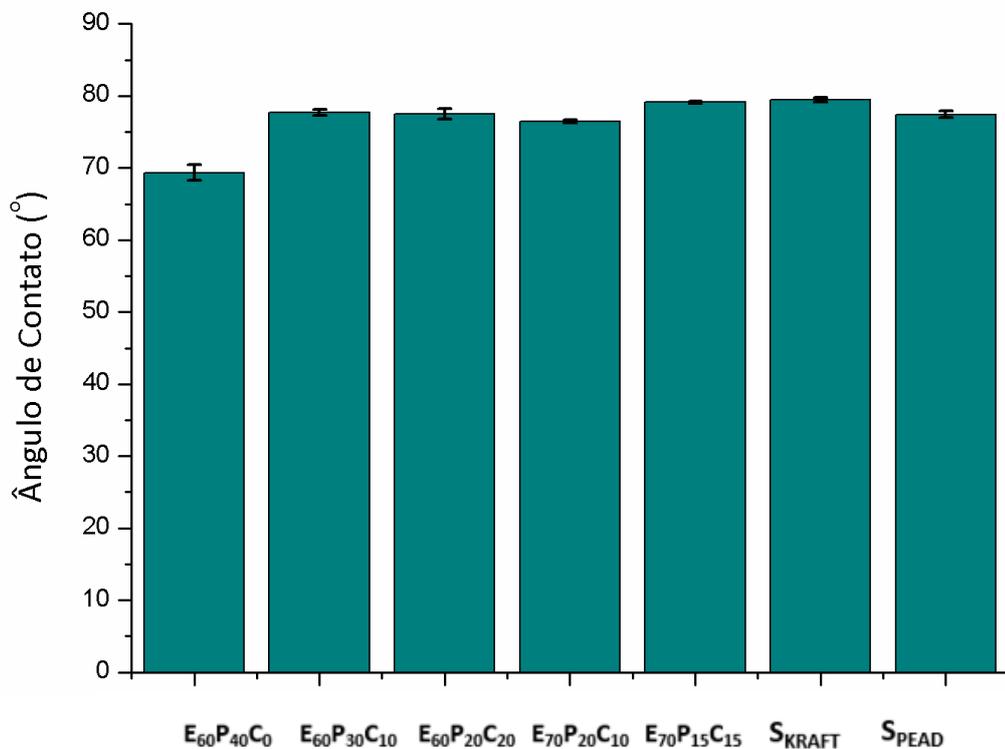
É observado na Figura 37 que, dentre todas as amostras analisadas, a amostra  $S_{KRAFT}$ , representada pela sacola de papel kraft, foi a que apresentou a menor estabilidade térmica, iniciando sua decomposição térmica em aproximadamente  $240^{\circ}\text{C}$ .

Os resultados apontaram que a amostra  $S_{PEAD}$ , representada pela sacola de PEAD, possui a maior estabilidade térmica, tendo sua decomposição térmica se iniciando em torno de  $400^{\circ}\text{C}$ , uma diferença de aproximadamente  $160^{\circ}\text{C}$  para a amostra  $S_{KRAFT}$ .

### 5.3 Ângulo de contato

A Figura 39 apresenta os resultados do ângulo de contato médio das amostras analisadas e seus respectivos desvios padrão.

**Figura 39: Ângulo de contato médio das amostras e seus respectivos desvio padrão**



Fonte: Elaborado pela autora, 2016

A amostra  $E_{60}P_{40}C_0$ , que corresponde a blenda polimérica de PBAT/PLA sem  $\text{CaCO}_3$ , apresentou o menor ângulo de contato. O PLA é encontrado na literatura com

ângulo de contato de aproximadamente  $72,5^\circ \pm 2,5$ , o que demonstra que a incorporação de PBAT praticamente não interferiu na hidrofobicidade da amostra (GORDOBIL et al., 2015).

Foi observado que a incorporação do Carbonato de Cálcio aumentou o ângulo de contato, ou seja, aumentou a hidrofobicidade das amostras.

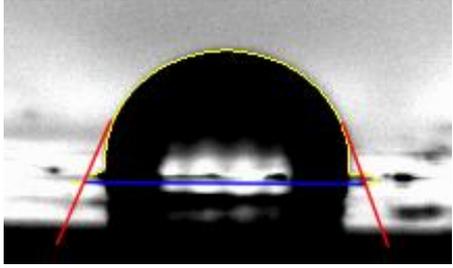
Esperava-se que a amostra S<sub>KRAFT</sub> tivesse o caráter mais hidrofílico dentre todas as amostras, no entanto, o comportamento observado foi oposto. Tal comportamento pode ser justificado por conta dos aditivos que são adicionados na sacola de papel kraft para o uso comercial.

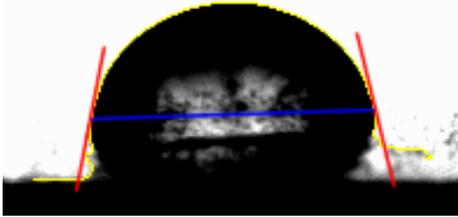
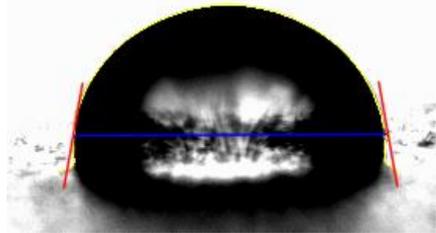
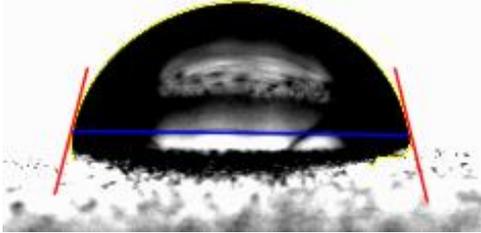
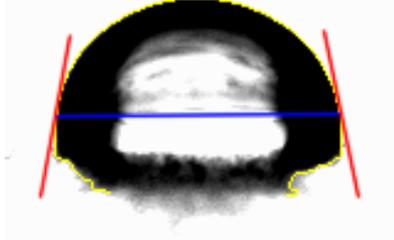
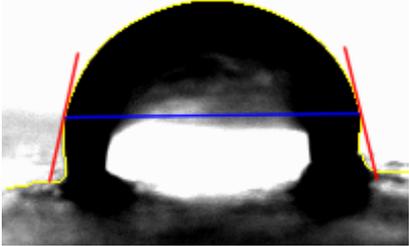
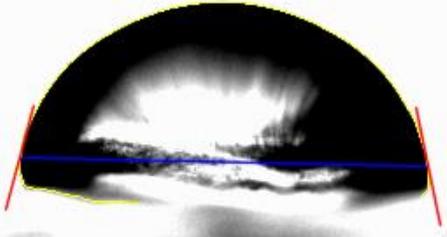
A amostra S<sub>PEAD</sub> apresentou ângulo de contato diferente do esperado, inferior a  $90^\circ$ . Segundo Moraes et al. (2014) o PEAD apresenta características hidrofóbicas, inibindo a hidrólise, tornando-o mais resistente à degradação, conforme comportamento apresentado na Avaliação da Biodegradação. No entanto, tal ocorrência apresentada no ângulo de contato, pode ser devido à incorporação de aditivos para o uso comercial da sacola de PEAD.

Todas as amostras analisadas apresentaram ângulo de contato inferior a  $90^\circ$ , demonstrando que a superfície do material foi molhada pelo líquido durante o ensaio, indicando assim uma superfície levemente hidrofílica (YUAN; LEE, 2013).

A Figura 40 apresenta as ilustrações da gota sobre a superfície das amostras analisadas, obtidas no ensaio do ângulo de contato.

**Figura 40: Ilustração da gota sobre a superfície da amostra obtida no ensaio do ângulo de contato**

Amostra	Ilustração da gota
E <sub>60</sub> P <sub>40</sub> C <sub>0</sub>	

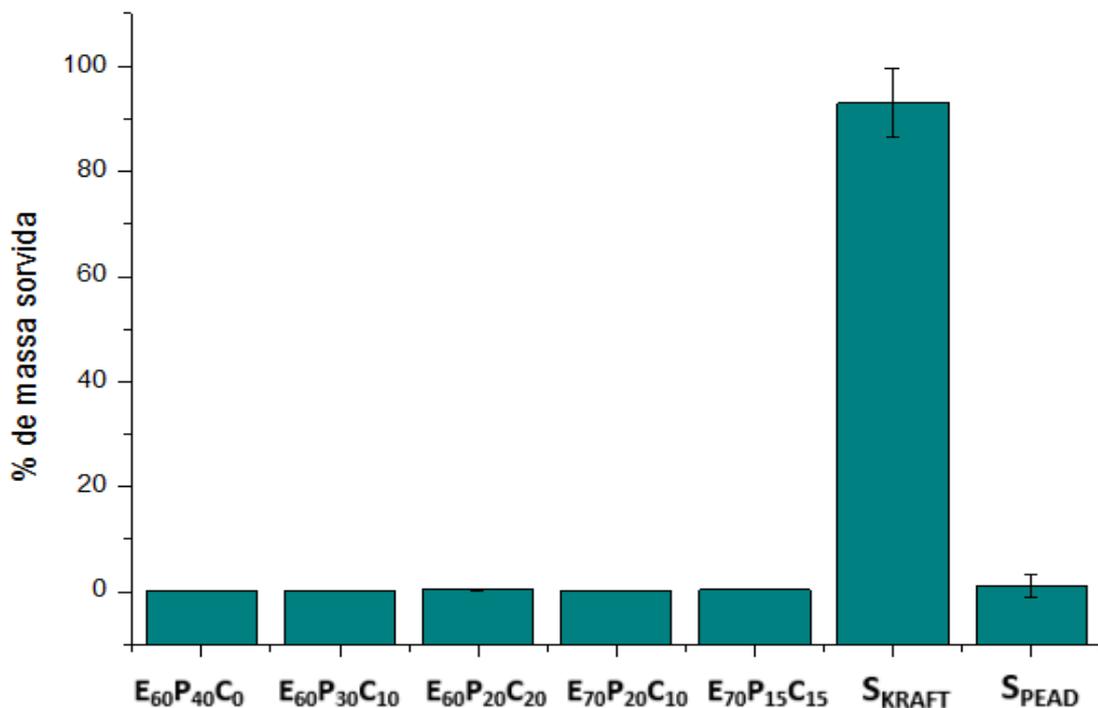
E <sub>60</sub> P <sub>30</sub> C <sub>10</sub>	
E <sub>60</sub> P <sub>20</sub> C <sub>20</sub>	
E <sub>70</sub> P <sub>20</sub> C <sub>10</sub>	
E <sub>70</sub> P <sub>15</sub> C <sub>15</sub>	
SKRAFT	
SPEAD	

Fonte: Elaborado pela autora, 2016

#### 5.4 Ensaio de sorção

Na Figura 41 são apresentados os percentuais (%) de massa sorvida das amostras, que representam a relação entre a quantidade de água absorvida pela amostra durante o período de tempo avaliado.

**Figura 41: Valores percentuais de massa sorvida das amostras analisadas**



Fonte: Elaborado pela autora, 2016

Na Figura 41 é possível observar que a amostra S<sub>KRAFT</sub>, representada pela sacola de papel kraft, apresentou o maior percentual de massa sorvida, ou seja, absorveu mais água do que as demais amostras, durante o mesmo intervalo de tempo do ensaio. Esse resultado mostra que o papel possui forte interação com a água, levando à sua fragmentação e rápida biodegradação no solo, com uma vida curta para mineralização, conforme também observado na avaliação da biodegradação em solo simulado.

As amostras representadas pelos filmes poliméricos biodegradáveis apresentaram o menor coeficiente de sorção (relação entre o percentual de massa sorvida e o tempo analisado). A incorporação do Carbonato de Cálcio não influenciou

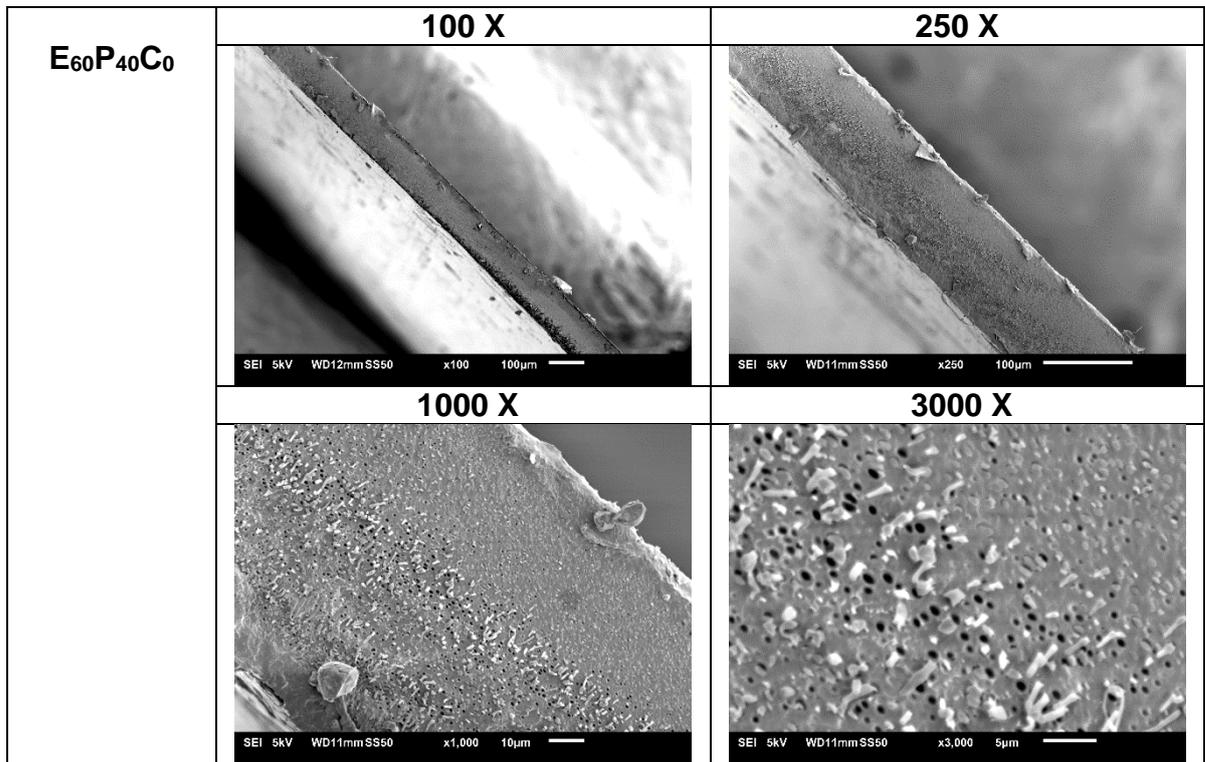
nos resultados, o coeficiente se manteve em aproximadamente 0,01. Tal comportamento demonstra que essas amostras não absorveram muita água durante o intervalo de tempo (336 horas) analisado no ensaio. Esse comportamento pode ser explicado pelo fato do material inorgânico ( $\text{CaCO}_3$ ) ter sido totalmente encapsulado pelo material polimérico, conforme pode ser observado pelas fotomicrografias apresentadas nas análises de microscopia eletrônica de varredura. Segundo Machado (2008) a absorção de umidade pode ser limitada através do encapsulamento do material pela matriz polimérica. Desse modo, pode-se explicar o baixo valor de biodegradação encontrado ao longo de 360 dias para os filmes poliméricos biodegradáveis desenvolvidos.

A amostra  $\text{S}_{\text{PEAD}}$  apresentou um comportamento similar às amostras representadas pelos filmes poliméricos desenvolvidos.

## **5.5 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)**

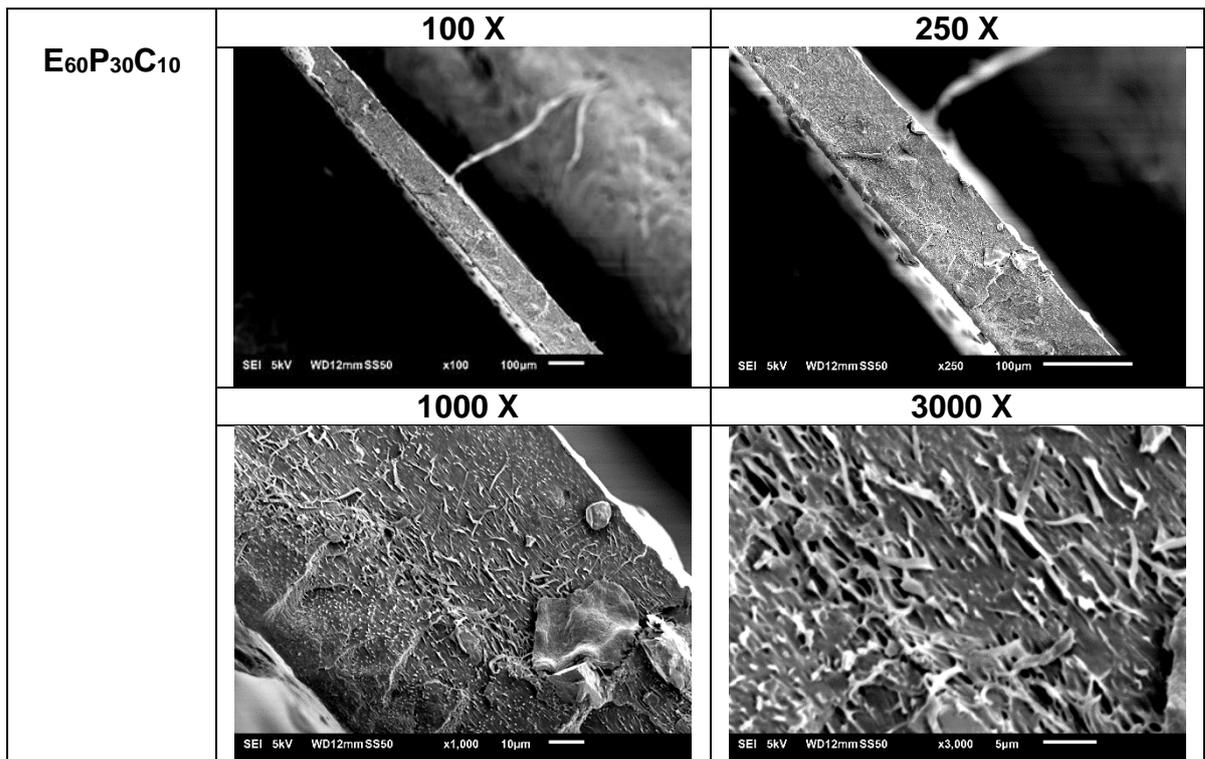
Nas Figuras 42, 43, 44, 45 e 46 é possível observar os resultados da Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) das amostras  $\text{E}_{60}\text{P}_{40}\text{C}_0$ ,  $\text{E}_{60}\text{P}_{30}\text{C}_{10}$ ,  $\text{E}_{60}\text{P}_{20}\text{C}_{20}$ ,  $\text{E}_{70}\text{P}_{20}\text{C}_{10}$  e  $\text{E}_{70}\text{P}_{15}\text{C}_{15}$ , respectivamente, antes de serem submetidos ao ensaio de avaliação da biodegradação em solo simulado, possibilitando a avaliação da morfologia dessas amostras.

Figura 42: Fotomicrografias, obtidas por MEV, da amostra  $E_{60}P_{40}C_0$ , com aumentos de 100 X, 250 X, 1000 X e 3000 X, antes do ensaio de biodegradação



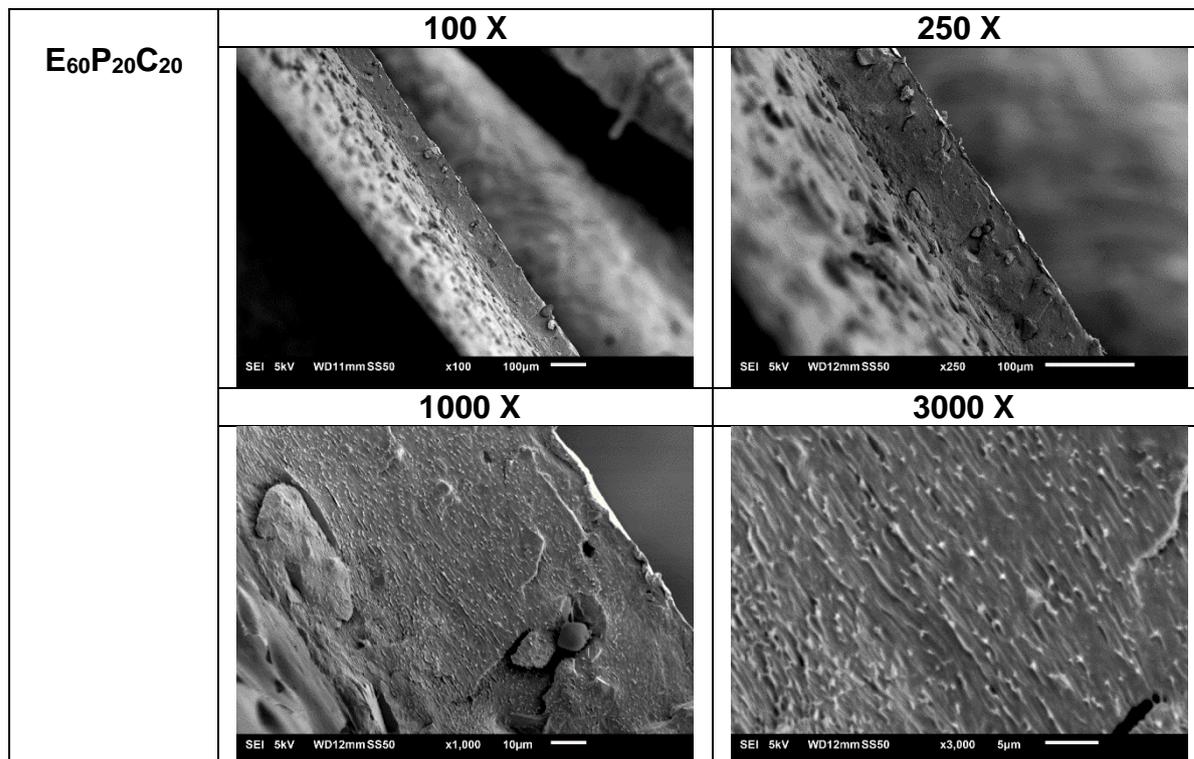
Fonte: Elaborado pela autora, 2016

Figura 43: Fotomicrografias, obtidas por MEV, da amostra  $E_{60}P_{30}C_{10}$ , com aumentos de 100 X, 250 X, 1000 X e 3000 X, antes do ensaio de biodegradação



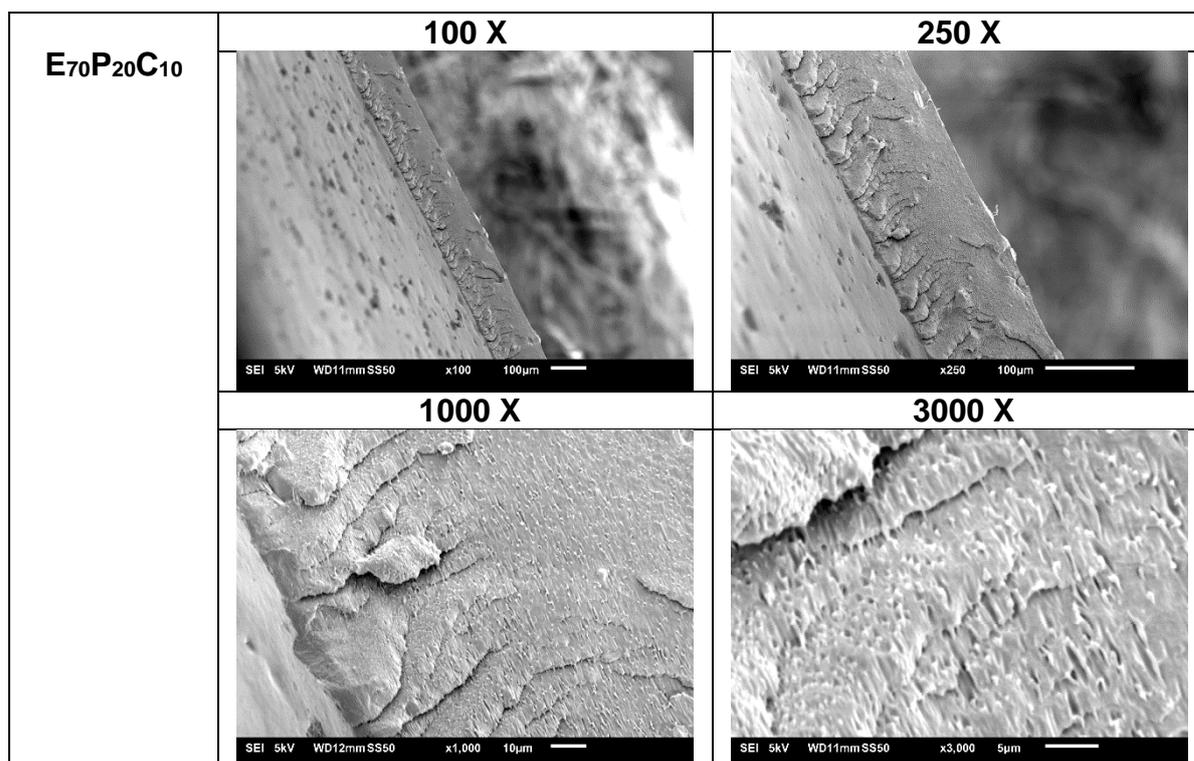
Fonte: Elaborado pela autora, 2016

Figura 44: Fotomicrografias, obtidas por MEV, da amostra E<sub>60</sub>P<sub>20</sub>C<sub>20</sub>, com aumentos de 100 X, 250 X, 1000 X e 3000 X, antes do ensaio de biodegradação



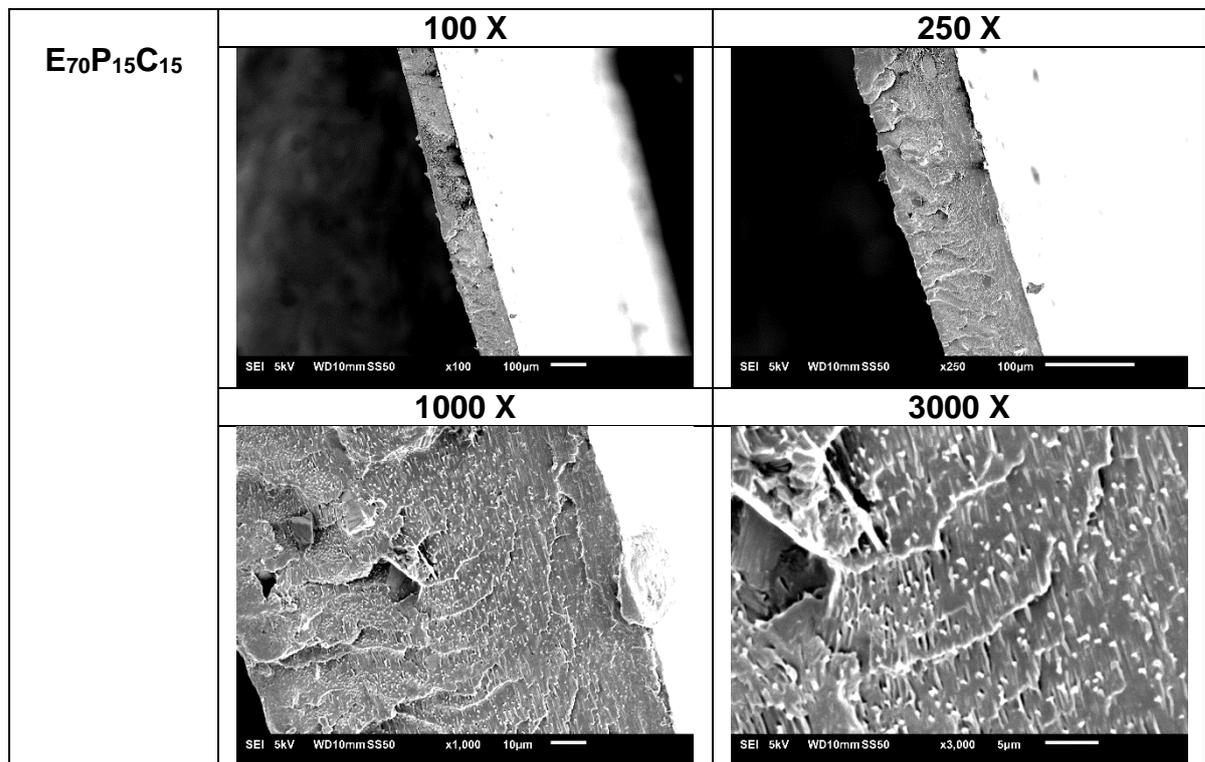
Fonte: Elaborado pela autora, 2016

Figura 45: Fotomicrografias, obtidas por MEV, da amostra E<sub>70</sub>P<sub>20</sub>C<sub>10</sub>, com aumentos de 100 X, 250 X, 1000 X e 3000 X, antes do ensaio de biodegradação



Fonte: Elaborado pela autora, 2016

**Figura 46: Fotomicrografias, obtidas por MEV, da amostra E<sub>70</sub>P<sub>15</sub>C<sub>15</sub>, com aumentos de 100 X, 250 X, 1000 X e 3000 X, antes do ensaio de biodegradação**



Fonte: Elaborado pela autora, 2016

É possível visualizar na Figura 42, que a amostra E<sub>60</sub>P<sub>40</sub>C<sub>0</sub>, sem incorporação de Carbonato de Cálcio, apresentou nítida separação de fases, onde é observado que as componentes esbranquiçadas, representados pelo PLA, não estão dispersos na parte cinza, representada pelo PBAT, indicando assim, uma imiscibilidade dos polímeros.

Se comparadas as fotomicrografias apresentadas na Figura 42 com as Figuras 43 a 46, percebe-se que a incorporação de Carbonato de Cálcio preencheu a maior parte dos poros observados na amostra E<sub>60</sub>P<sub>40</sub>C<sub>0</sub> após a fratura em nitrogênio líquido, evidenciando que a incorporação de CaCO<sub>3</sub> favoreceu a interação do PLA com o PBAT.

As fotomicrografias das amostras que possuem até 15% de Carbonato de Cálcio, ou seja, as amostras E<sub>60</sub>P<sub>30</sub>C<sub>10</sub>, E<sub>70</sub>P<sub>20</sub>C<sub>10</sub> e E<sub>70</sub>P<sub>15</sub>C<sub>15</sub>, demonstraram boa dispersão com os polímeros biodegradáveis, não apresentando aglomerados excessivos de CaCO<sub>3</sub>. Segundo Silva et al. (2013), os aglomerados da carga justificam a atuação do CaCO<sub>3</sub> como concentrador de tensão. Tal ocorrência pode justificar o

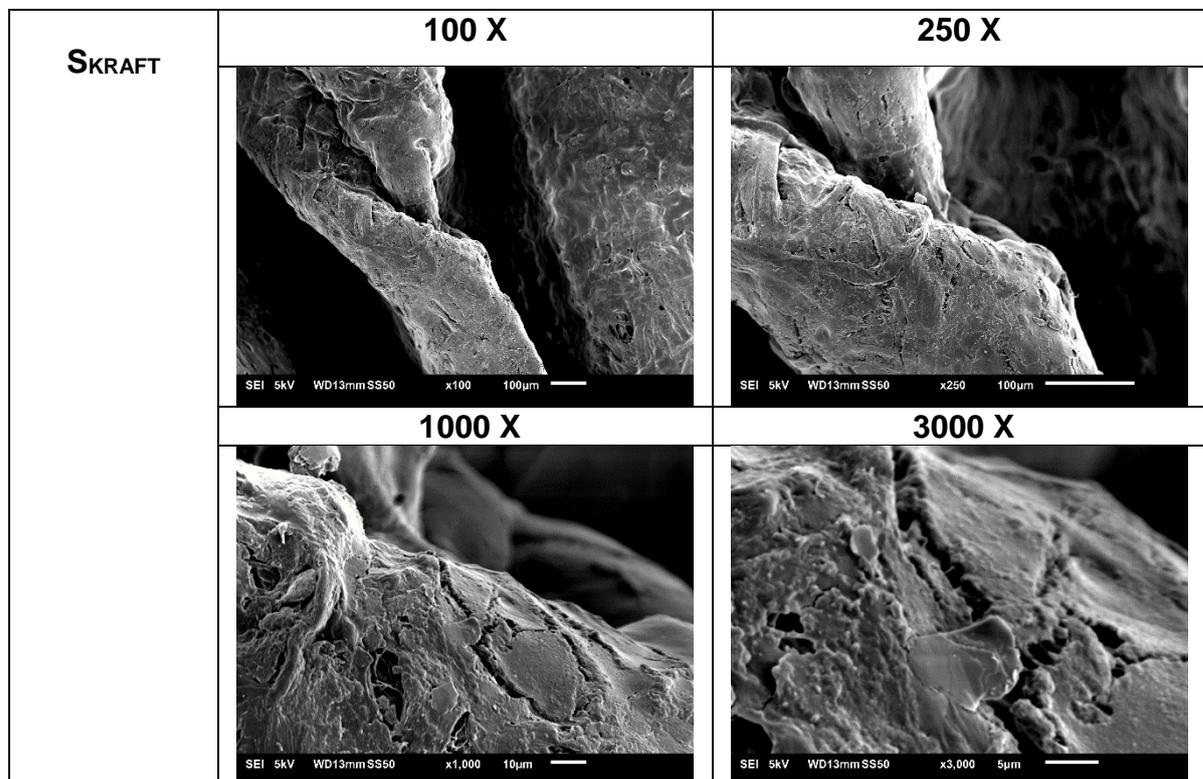
motivo pelo qual as amostras com incorporação da carga tiveram aumento da rigidez, conforme apresentado no resultado do Módulo de Young.

Por outro lado, a amostra E<sub>60</sub>P<sub>20</sub>C<sub>20</sub>, que contém 20% de Carbonato de Cálcio, apresentou vários aglomerados que podem ser observados nas fotomicrografias da amostra após fratura em nitrogênio líquido. Essa falta de distribuição ocasionou o aumento da rigidez da amostra, já que a carga atuou como concentrador de tensão, conforme mencionado anteriormente.

Os aglomerados de CaCO<sub>3</sub> apresentados nas amostras ocasionaram vazios na amostra. Segundo Teamsinsungvon; Ruksakulpiwat; Jarukumjorn (2010) que incorporaram 5% e 30% de Carbonato de Cálcio em blendas poliméricas de PBAT/PLA, esses vazios podem se transformar em fissuras resultando em redução do alongamento na ruptura das amostras. Tal comportamento foi observado no ensaio mecânico e apresentado nos resultados de alongamento na ruptura.

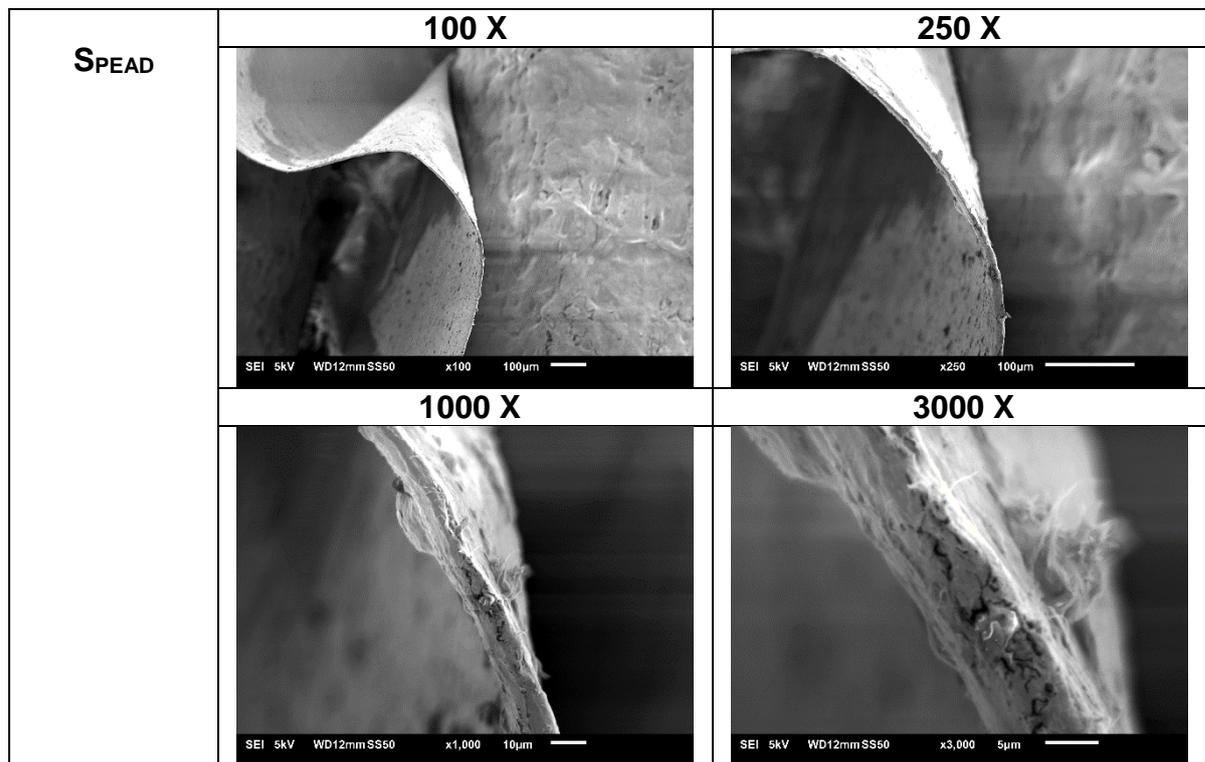
As Figuras 47 e 48 apresentam as morfologias das sacolas de papel kraft e de polietileno de alta densidade, respectivamente.

**Figura 47: Fotomicrografias, obtidas por MEV, da amostra S<sub>KRAFT</sub>, com aumentos de 100 X, 250 X, 1000 X e 3000 X**



Fonte: Elaborado pela autora, 2016

**Figura 48: Fotomicrografias, obtidas por MEV, da amostra S<sub>PEAD</sub>, com aumentos de 100 X, 250 X, 1000 X e 3000 X**



Fonte: Elaborado pela autora, 2016

Na análise morfológica da amostra S<sub>KRAFT</sub> foi possível observar uma superfície heterogênea, conforme apresentado na Figura 47. Esse comportamento pode ser atribuído à presença de diferentes componentes na amostra, como por exemplo lignina, hemicelulose e celulose.

Na Figura 48 é possível observar as fotomicrografias da amostra S<sub>PEAD</sub>, que mesmo sendo representada por um filme fino (sacola de polietileno de alta densidade), foi possível verificar a presença de aditivos, após a fratura em nitrogênio líquido. Também é observado que esses aditivos utilizados não estão bem dispersos na matriz polimérica da amostra.

## 5.6 Avaliação da biodegradação

### 5.6.1 Análise do solo

A Tabela 24 apresenta os resultados de alguns parâmetros analisados no solo simulado em que as amostras foram submetidas, no início do ensaio de biodegradação.

**Tabela 24: Parâmetros analisados no solo simulado no início do ensaio de biodegradação**

<b>pH</b>	<b>Umidade</b>	<b>% Matéria Orgânica</b>	<b>% Carbono Total</b>	<b>% Nitrogênio Total</b>	<b>Relação C/N</b>
7,02	28,44	22,07	12,26	0,4	30,65

Fonte: Elaborado pela autora, 2016

Todos os parâmetros analisados no solo simulado mostraram-se adequados em relação ao pH, umidade, teor de matéria orgânica, percentual de carbono total, percentual de nitrogênio total e relação C/N, para o desenvolvimento e crescimento de vários tipos de micro-organismos.

Durante o ensaio de biodegradação, foi possível observar alguns fungos sobre o solo simulado ao longo do tempo do ensaio, o que sugere a ação dos micro-organismos, conforme Figura 49.

**Figura 49: Ilustração da presença de micro-organismos no solo simulado durante o ensaio de biodegradação**

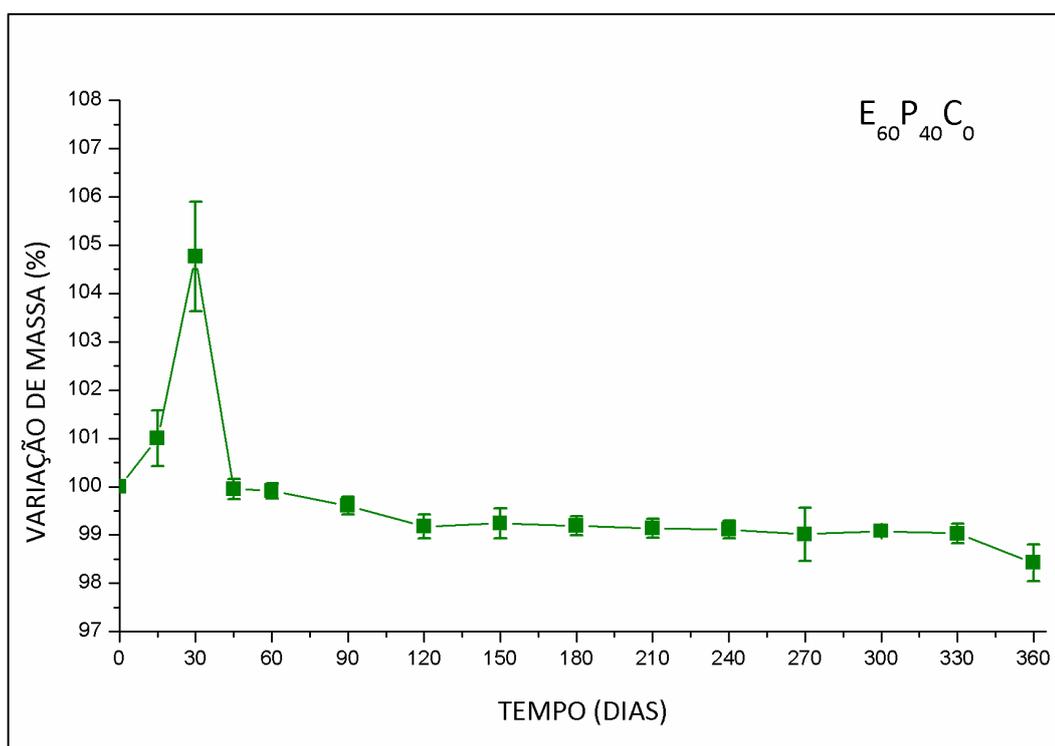


Fonte: Elaborado pela autora, 2016

### 5.6.2 Variação de massa

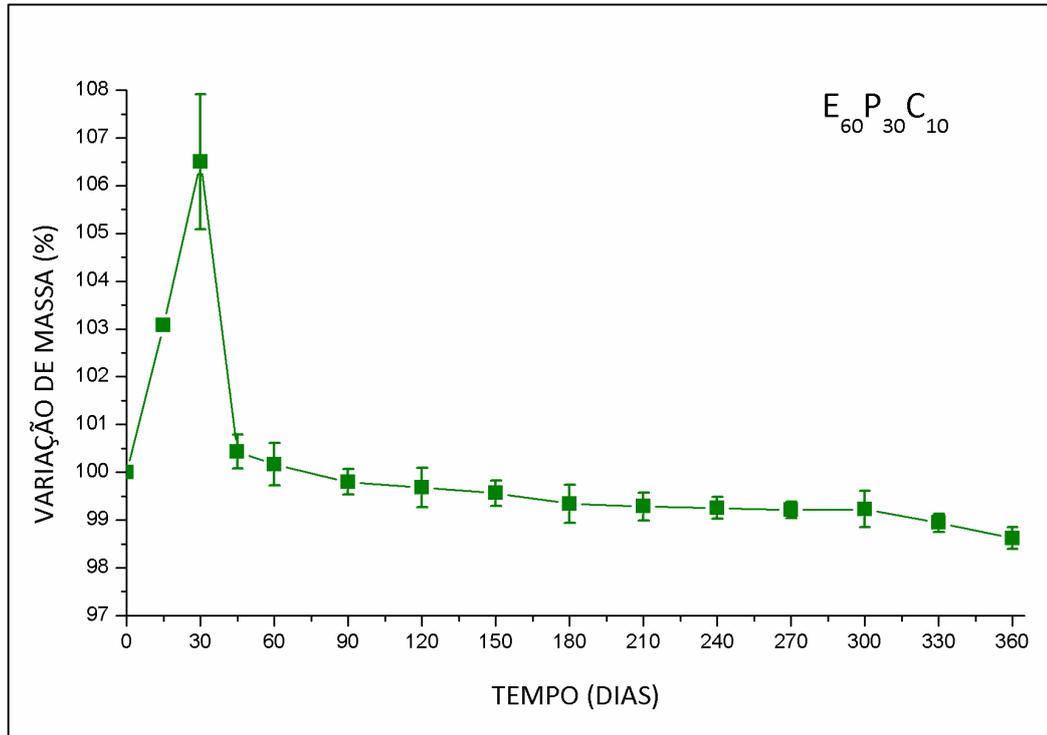
As Figuras 50, 51, 52, 53 e 54 correspondem às variações de massa durante o ensaio de biodegradação das amostras E<sub>60</sub>P<sub>40</sub>C<sub>0</sub>, E<sub>60</sub>P<sub>30</sub>C<sub>10</sub>, E<sub>60</sub>P<sub>20</sub>C<sub>20</sub>, E<sub>70</sub>P<sub>20</sub>C<sub>10</sub> e E<sub>70</sub>P<sub>15</sub>C<sub>15</sub>, respectivamente.

**Figura 50: Variação de massa da amostra E<sub>60</sub>P<sub>40</sub>C<sub>0</sub> durante o ensaio de biodegradação**



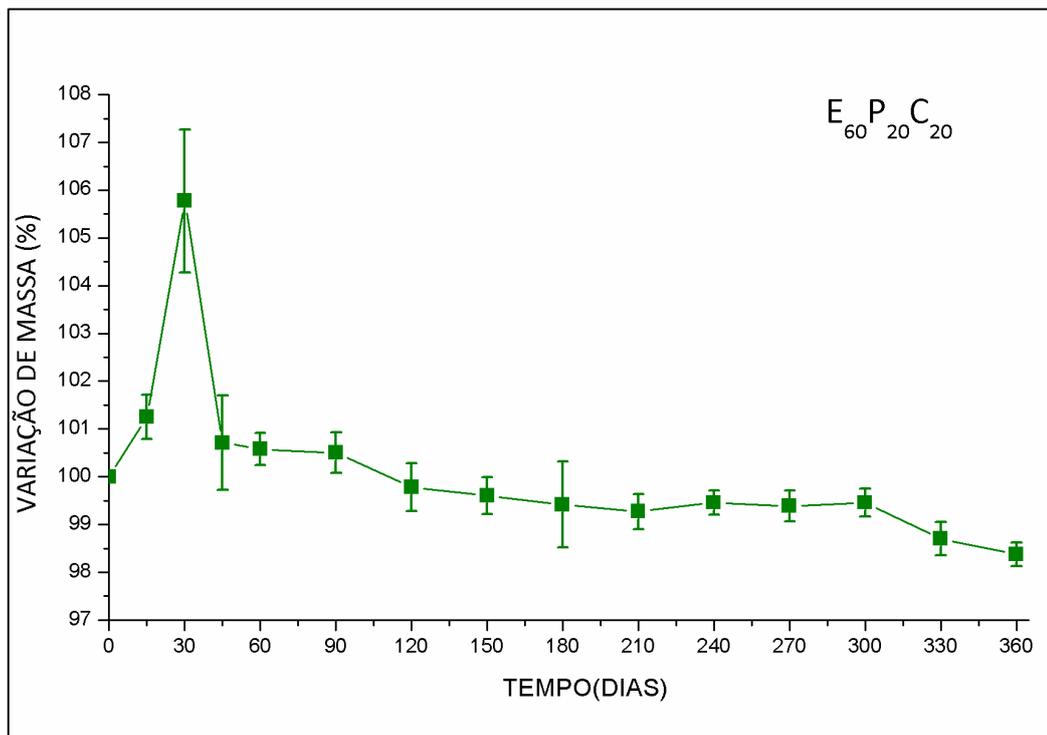
Fonte: Elaborado pela autora, 2016

**Figura 51: Variação de massa da amostra  $E_{60}P_{30}C_{10}$  durante o ensaio de biodegradação**



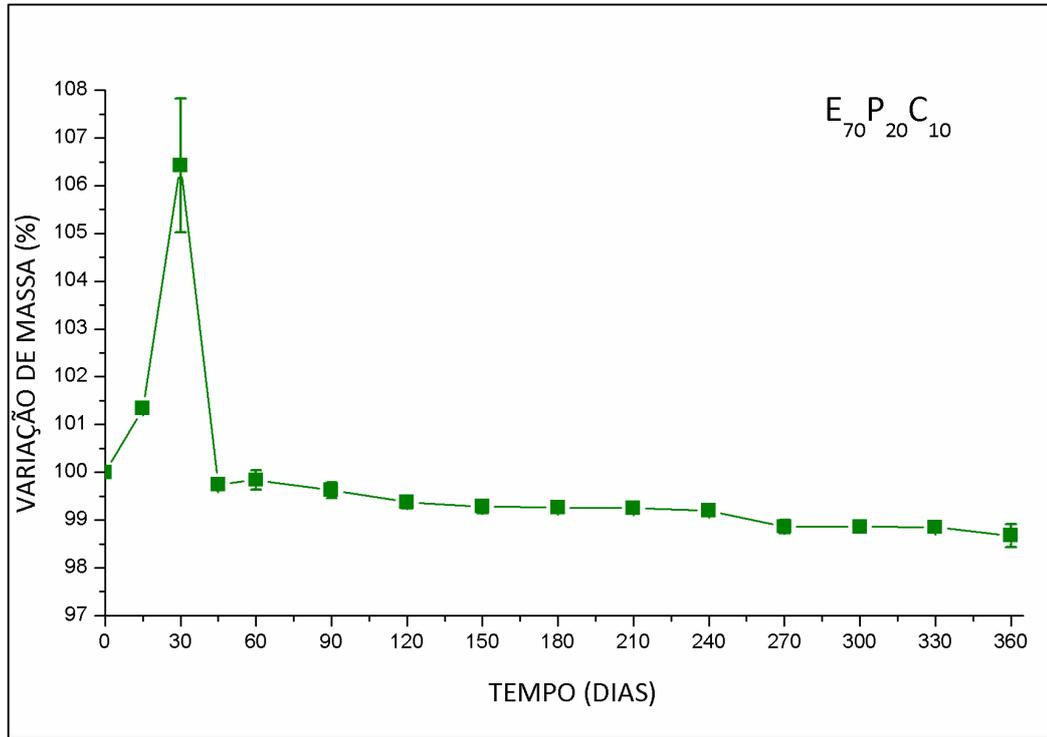
Fonte: Elaborado pela autora, 2016

**Figura 52: Variação de massa da amostra  $E_{60}P_{20}C_{20}$  durante o ensaio de biodegradação**



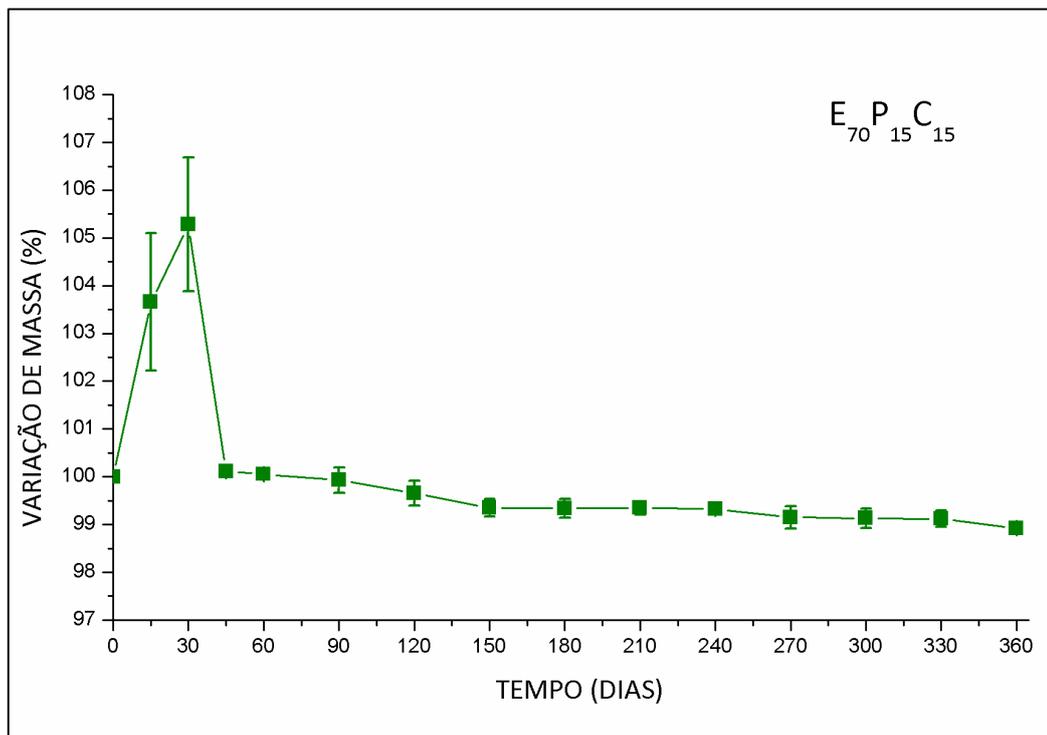
Fonte: Elaborado pela autora, 2016

**Figura 53: Variação de massa da amostra E<sub>70</sub>P<sub>20</sub>C<sub>10</sub> durante o ensaio de biodegradação**



Fonte: Elaborado pela autora, 2016

**Figura 54: Variação de massa da amostra E<sub>70</sub>P<sub>15</sub>C<sub>15</sub> durante o ensaio de biodegradação**



Fonte: Elaborado pela autora, 2016

É observado nos gráficos, apresentados nas Figuras 50-54, a variação de massa das amostras representadas pelos filmes desenvolvidos. Neles é observado um aumento no percentual de massa nos primeiros quarenta dias iniciais do ensaio de biodegradação em solo. Segundo Bardi e Rosa (2007), os primeiros dias de envelhecimento em solo simulado correspondem à fase abiótica da biodegradação, na qual as macromoléculas dos polímeros sofrem absorção e/ou adsorção das moléculas de água, o que acarreta em um aumento da massa dos filmes. Esse comportamento poderá iniciar o processo de hidrólise dos materiais o que conseqüentemente poderá produzir fragmentos moleculares menores, tais como monômeros e oligômeros. Portanto, esse aumento no percentual de massa apresentado pelas amostras sugere que as mesmas absorveram água, o que poderá facilitar a ocorrência da hidrólise dos polímeros.

Durante os 360 dias de ensaio de biodegradação, não foi possível observar grandes perdas de massa para as amostras representadas pelos filmes poliméricos desenvolvidos.

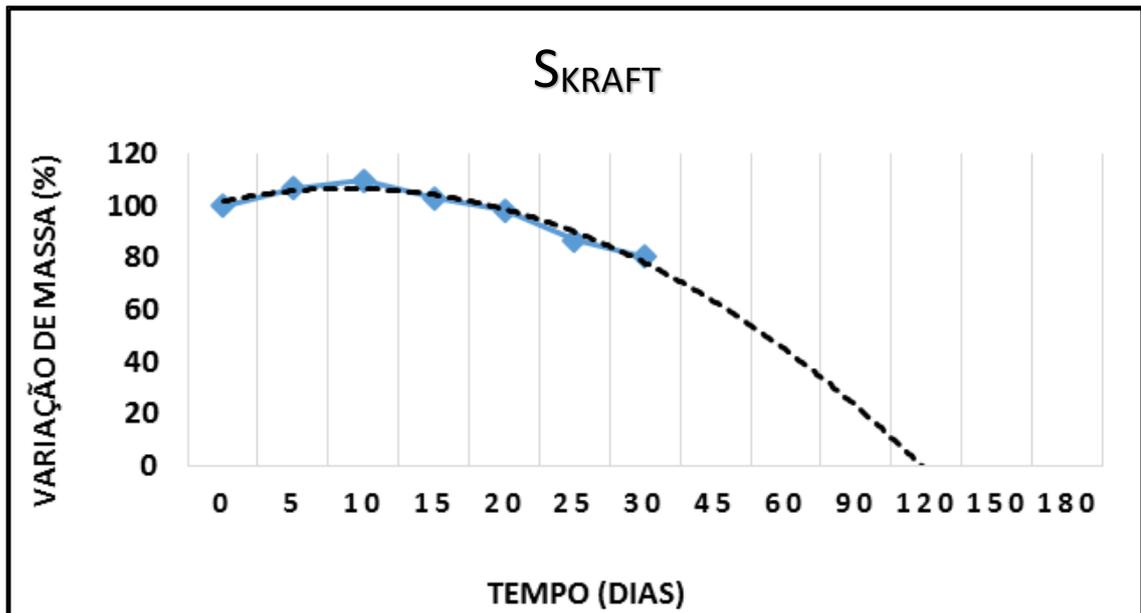
É analisado que a incorporação de Carbonato de Cálcio não interferiu de forma expressiva nos resultados do ensaio de biodegradação durante os 360 dias. Isso pode ser observado devido a comparação das amostras que possuem a carga com a amostra E<sub>60</sub>P<sub>40</sub>C<sub>0</sub>, que não possui incorporação de CaCO<sub>3</sub>. No entanto, nota-se que a amostra com incorporação de 20% de Carbonato de Cálcio, teve maior facilidade para perder massa na condição do ensaio.

Casarin et al. (2013) avaliaram a biodegradação em solo simulado da mistura PBAT/ PLA, de nome comercial Ecoflex<sup>®</sup>, em 30, 60 e 90 dias e obtiveram comportamentos similares. Os resultados apresentaram percentuais de perdas de massa de 0,14±0,05, 0,74±0,03 e 3,3±0,2, para os períodos de 30, 60 e 90 dias, respectivamente.

Weng et al. (2013) avaliaram a mudança de aparência dos polímeros PBAT e PLA e da blenda polimérica PBAT/PLA durante quatro meses em ensaio de biodegradação em solo simulado. Os resultados mostraram que após os quatro meses de ensaio, a blenda polimérica PBAT/PLA se tornou frágil. No entanto, os polímeros PBAT e PLA apresentaram mudanças mais relevantes durante o ensaio.

Na Figura 55 é apresentada a variação de massa da amostra SKRAFT, durante o ensaio de biodegradação em solo simulado, no período de 180 dias.

Figura 55: Valores médios da variação de massa da amostra  $S_{KRAFT}$  em relação ao tempo de biodegradação em solo simulado



Fonte: Elaborado pela autora, 2016

Os resultados mostraram que a amostra  $S_{KRAFT}$  possui uma elevada taxa de biodegradabilidade, perdendo cerca de 20% de massa nos primeiros 30 dias de ensaio. Neste estudo foi utilizado o gráfico de tendência, visto que após o período de 30 dias de ensaio, não foi mais possível realizar uma análise quantitativa da perda de massa da amostra  $S_{KRAFT}$ . A linha de tendência demonstrada no gráfico, prevê uma degradação total da amostra  $S_{KRAFT}$  em aproximadamente 120 dias de ensaio.

O aspecto visual da amostra pode ser observado na Figura 56, onde é possível observar apenas alguns fragmentos da amostra, impossibilitando uma pesagem completa do material. Alvarez et al. (2009) avaliaram a biodegradação de resíduos de papel kraft durante o período de 45 dias e observaram o mesmo comportamento.

**Figura 56: Ilustração da amostra S<sub>KRAFT</sub> após o período de 30 dias do ensaio de biodegradação**



Fonte: Elaborado pela autora, 2016

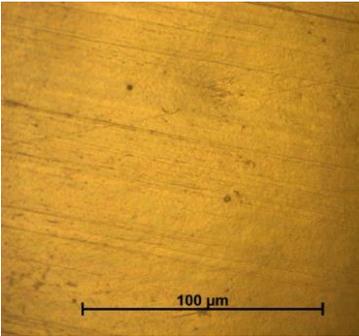
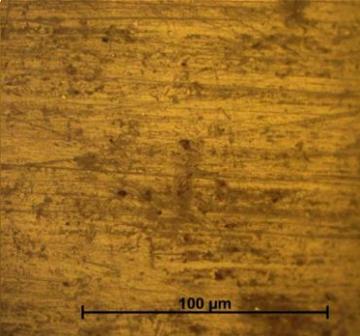
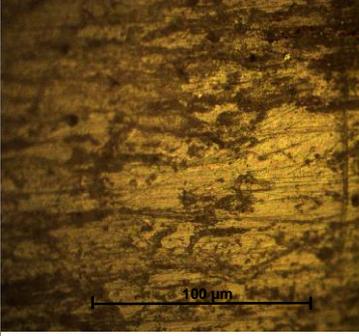
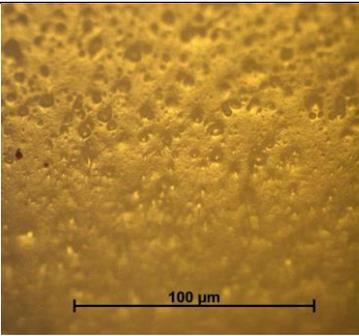
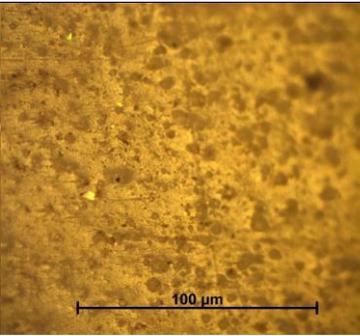
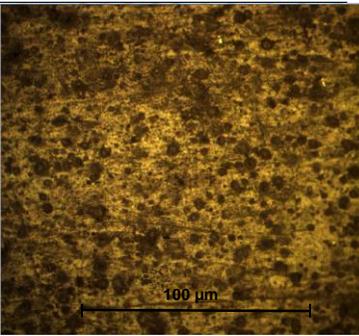
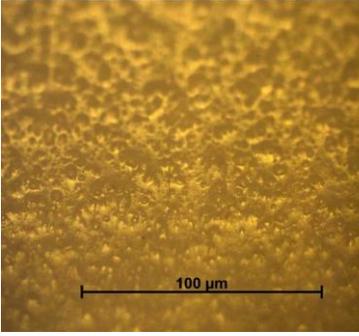
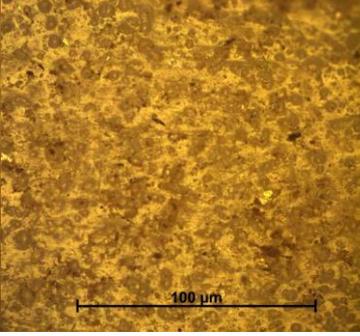
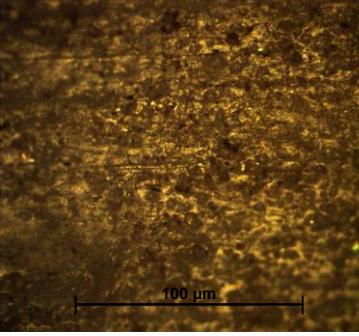
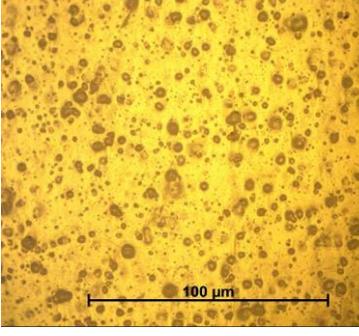
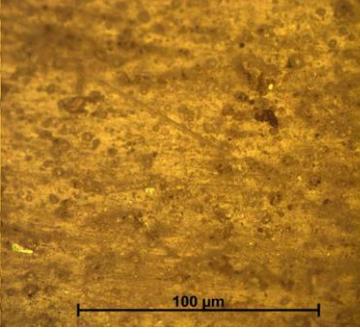
Por outro lado, a amostra S<sub>PEAD</sub>, representada pela sacola de polietileno de alta densidade, não apresentou perdas de massa expressivas durante o ensaio de biodegradação em solo simulado de 360 dias, ou seja, o valor da massa permaneceu em aproximadamente 100% (igual a massa inicial). Moraes et al. (2014) obtiveram um resultado semelhante e concluíram que esse comportamento apresentado na biodegradação da sacola de PEAD é referente à hidrofobicidade do polímero, que inibe a hidrólise, tornando-o mais resistente à degradação.

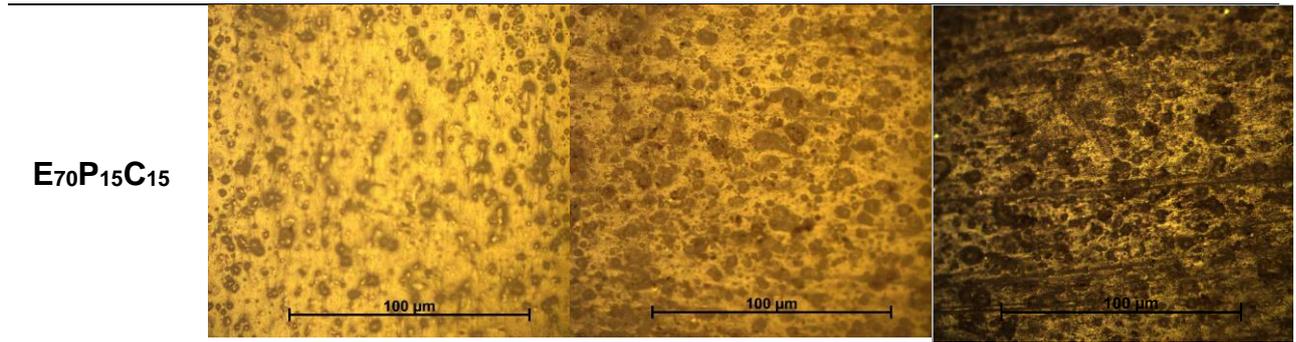
### **5.6.3 Microscopia óptica**

Para fins de acompanhamento da biodegradação, foram analisadas as superfícies das amostras em um microscópio óptico polarizado.

Na Tabela 25, são apresentadas fotomicrografias, em que é possível observar os aspectos das amostras no início do ensaio de biodegradação, após o período de 180 dias e após 360 dias.

Tabela 25: Fotomicrografias das amostras iniciais, após 180 dias e após 360 dias do ensaio de biodegradação em solo simulado

Amostras	Fotomicrografias iniciais das amostras	Fotomicrografias das amostras após 180 dias	Fotomicrografias das amostras após 360 dias
<b>E<sub>60</sub>P<sub>40</sub>C<sub>0</sub></b>			
<b>E<sub>60</sub>P<sub>30</sub>C<sub>10</sub></b>			
<b>E<sub>60</sub>P<sub>20</sub>C<sub>20</sub></b>			
<b>E<sub>70</sub>P<sub>20</sub>C<sub>10</sub></b>			



Fonte: Elaborado pela autora, 2016

Todas as amostras apresentaram modificações visuais na superfície durante o ensaio de biodegradação, ou seja, é possível observar um escurecimento, perda de brilho e aumento de fissuras e eventualmente rachaduras.

As amostras que possuem Carbonato de Cálcio foram as que apresentaram as maiores mudanças nas suas superfícies, principalmente na coloração e no aumento de fissuras, sendo que pode-se observar maiores alterações nas superfícies das amostras com maiores teores de Carbonato de Cálcio incorporado. Esse comportamento é evidenciado com a amostra E<sub>60</sub>P<sub>20</sub>C<sub>20</sub>, a qual apresentou o maior escurecimento da superfície e um elevado número de microfissuras e eventualmente rachaduras, após os 360 dias do ensaio de biodegradação. Segundo Shah et al. (2008), as alterações visuais nas superfícies das amostras, como por exemplo mudanças na coloração, rugosidade e formação de buracos e rachaduras, indicam que houveram ataques microbianos e que ocorreu uma (bio)degradação.

A fotomicrografia da amostra S<sub>PEAD</sub>, após 360 dias do ensaio de ensaio de biodegradação em solo simulado, é apresentada na Figura 57.

**Figura 57: Fotomicrografia da amostra S<sub>PEAD</sub>, após 360 dias do ensaio de biodegradação em solo simulado**



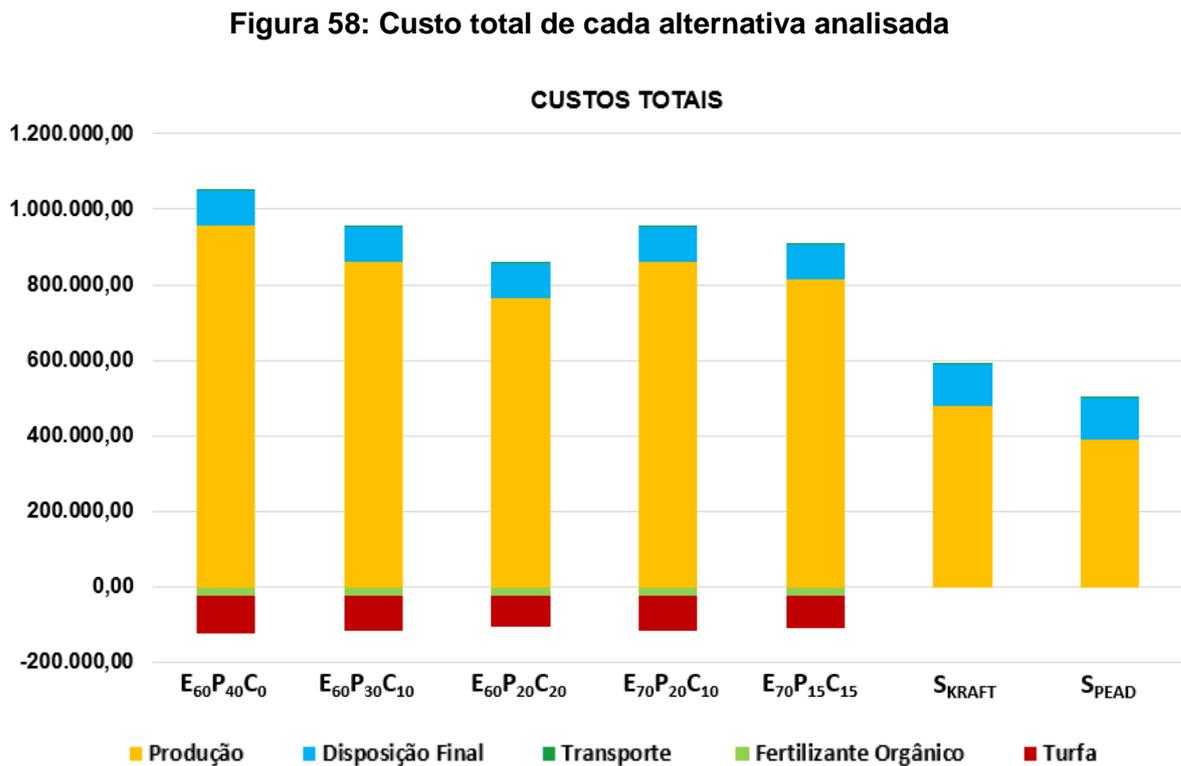
Fonte: Elaborado pela autora, 2016

Após 360 dias do ensaio de biodegradação em solo simulado da amostra  $S_{PEAD}$ , não foram observadas alterações visuais na fotomicrografia, como por exemplo rugosidade ou formação de buracos e rachaduras, sugerindo assim, que não houve um ataque microbiano na amostra (SHAH et al., 2008).

## 5.7 Análise de Ecoeficiência

### 5.7.1 Impactos Econômicos

Os impactos econômicos foram calculados utilizando o custo total para cada alternativa estudada, de acordo com a Unidade Funcional de 6.642.504 sacolas descartáveis. A Figura 58 apresenta o custo total de cada alternativa analisada.



Na Figura 58 é observado que para todas as alternativas comparadas, os impactos econômicos mais expressivos foram apontados na fase de produção. Esses impactos representam aproximadamente 80% do custo total para as amostras  $S_{KRAFT}$  e  $S_{PEAD}$  e cerca de 90% do custo total para as sacolas manufaturadas com os filmes poliméricos desenvolvidos.

Os custos na fase de produção estão diretamente relacionados com o custo de aquisição das matérias-primas utilizadas, acarretando conseqüentemente no preço de venda da sacola descartável ao supermercado.

A Tabela 26 apresenta o preço de venda, em reais, de cada unidade de sacola analisada.

**Tabela 26: Preço da unidade (R\$) de cada sacola analisada**

<b>Amostra</b>	<b>Preço da unidade</b>
E <sub>60</sub> P <sub>40</sub> C <sub>0</sub>	0,1440
E <sub>60</sub> P <sub>30</sub> C <sub>10</sub>	0,1296
E <sub>60</sub> P <sub>20</sub> C <sub>20</sub>	0,1152
E <sub>70</sub> P <sub>20</sub> C <sub>10</sub>	0,1296
E <sub>70</sub> P <sub>15</sub> C <sub>15</sub>	0,1224
S <sub>KRAFT</sub>	0,072
S <sub>PEAD</sub>	0,059

Fonte: Elaborado pela autora, 2016

A amostra S<sub>PEAD</sub> foi a que apresentou o menor impacto econômico, com custo total de R\$ 501.862,00/UF, em todo o ciclo de vida estudado. Esse baixo impacto econômico é resultante do baixo custo de produção e aquisição de sua matéria-prima, o polietileno de alta densidade, visto que é considerado um polímero commodity.

Para as sacolas manufaturas com os polímeros biodegradáveis, que obtiveram os maiores impactos econômicos, os resultados também mostraram que a incorporação de Carbonato de Cálcio diminui o impacto econômico da amostra, portanto a amostra E<sub>60</sub>P<sub>40</sub>C<sub>0</sub>, que não possui a carga apresentou o maior impacto econômico. Essa diferença pode ser visualiza na Tabela 27, que apresenta o custo total para cada amostra analisada, durante o ciclo de vida estudado.

**Tabela 27: Custo total para cada amostra analisada**

<b>Amostra</b>	<b>Custo total</b>
E <sub>60</sub> P <sub>40</sub> C <sub>0</sub>	928.910,00
E <sub>60</sub> P <sub>30</sub> C <sub>10</sub>	843.328,00
E <sub>60</sub> P <sub>20</sub> C <sub>20</sub>	757.745,00
E <sub>70</sub> P <sub>20</sub> C <sub>10</sub>	843.328,00
E <sub>70</sub> P <sub>15</sub> C <sub>15</sub>	800.536,00

Fonte: Elaborado pela autora, 2016

A amostra SKRAFT apresentou impactos econômicos intermediários, tendo um custo total de R\$ 593.985,00/UF.

É observado na Figura 58 que o custo com a disposição final representou o segundo maior impacto econômico em todas as alternativas analisadas, devido ao custo para encaminhar toneladas de resíduos às empresas de compostagem e de aterro sanitário.

O custo com transporte, embora não demonstrado expressivamente no gráfico, apresentou o terceiro maior impacto econômico nas alternativas analisadas, tendo um impacto maior nas sacolas manufaturas com polímeros biodegradáveis, devido à distância da indústria de produção da matéria-prima (Ludwigshafen, Alemanha) até a indústria onde as sacolas são manufaturadas (São Paulo, Brasil). A Tabela 28 apresenta o custo total de transporte para cada amostra analisada.

**Tabela 28: Custo total de transporte para cada amostra analisada**

<b>Amostra</b>	<b>Custo total do transporte</b>
E <sub>60</sub> P <sub>40</sub> C <sub>0</sub>	3.933,90
E <sub>60</sub> P <sub>30</sub> C <sub>10</sub>	3.933,90
E <sub>60</sub> P <sub>20</sub> C <sub>20</sub>	3.933,90
E <sub>70</sub> P <sub>20</sub> C <sub>10</sub>	3.933,90
E <sub>70</sub> P <sub>15</sub> C <sub>15</sub>	3.933,90
SKRAFT	2.900,98
SPEAD	1.023,75

Fonte: Elaborado pela autora, 2016

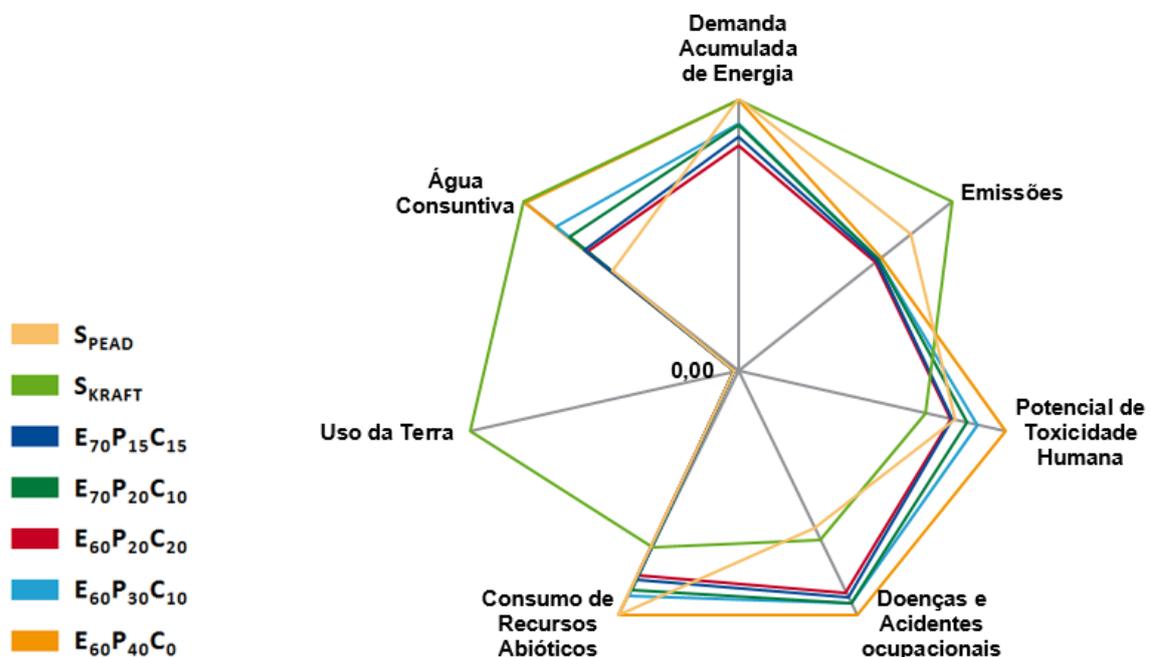
Para as amostras  $S_{KRAFT}$  e  $S_{PEAD}$ , a fase de ciclo de vida referente ao transporte apresentou os menores impactos econômicos em comparação com as demais cinco amostras, devido à pequena distância entre os locais de produção e manufatura considerados no ciclo de vida das sacolas.

### 5.7.2 Impactos Ambientais

As sete categorias de impacto ambiental avaliadas na Análise de Ecoeficiência são apresentadas pela metodologia no gráfico chamado de Impressão Ambiental.

A Figura 59 apresenta a Impressão Ambiental do estudo, ou seja, a representação dos impactos ambientais decorrentes do cumprimento da função das alternativas analisadas. Para cada categoria de impacto ambiental, a alternativa posicionada mais ao extremo do gráfico é aquela menos favorável na categoria avaliada, em relação às demais alternativas.

**Figura 59: Impressão Ambiental da Análise de Ecoeficiência**



Fonte: Elaborado pela autora, 2016

A Impressão Ambiental fornece uma visão geral dos impactos ambientais decorrentes das sete alternativas estudadas. Os valores obtidos para cada categoria de impacto ambiental foram normalizados entre as alternativas (intervalos de 0 a 1).

A normalização foi feita atribuindo o valor 1 (ou seja, 100% de impacto) à alternativa com maior impacto, calculando-se as demais por linearidade, uma vez que se trata de uma análise comparativa.

Observou-se que a amostra S<sub>KRAFT</sub> possui impactos ambientais relevantes em quatro das sete categorias avaliadas: Uso da Terra, Água Consuntiva, Demanda Acumulada de Energia e Emissões, sendo que esses impactos estão relacionados, principalmente, ao processo produtivo do papel kraft, ou seja, a matéria-prima utilizada para manufatura da sacola de papel kraft. Por outro lado, a amostra S<sub>PEAD</sub> apresentou impactos relevantes em apenas duas categorias: Demanda Acumulada de Energia e Consumo de Recursos Abióticos.

As sacolas manufaturadas com polímeros biodegradáveis apresentaram os mais altos impactos nas categorias Consumo de Recursos Abióticos, Doenças e Acidentes Ocupacionais, Potencial de Toxicidade Humana e Demanda Acumulada de Energia. Esses impactos ambientais estão relacionados, principalmente, ao processo produtivo dos polímeros biodegradáveis, utilizados para manufatura das sacolas.

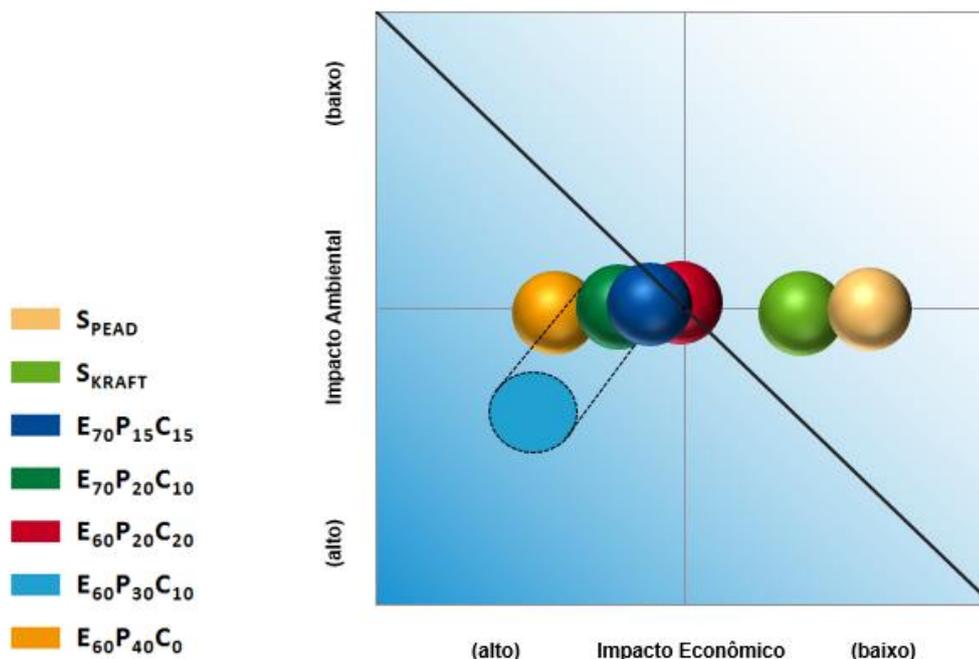
### **5.7.3 Matriz de Ecoeficiência**

Conforme proposto pela Análise de Ecoeficiência, os impactos ambientais e econômicos foram compilados e apresentados no gráfico chamado pela metodologia de Matriz de Ecoeficiência. Nela é possível analisar a alternativa com os menores impactos ambientais e econômicos relativos, isto é, a alternativa mais ecoeficiente em comparação com as demais.

A Figura 60 apresenta a Matriz de Ecoeficiência das alternativas analisadas, onde no eixo horizontal podemos visualizar os impactos econômicos e no eixo vertical os impactos ambientais.

As escalas dos eixos X e Y são propositalmente invertidas, por uma definição metodológica da Análise de Ecoeficiência quanto à comunicação de resultados (NSF, 2013). Portanto, a alternativa mais ecoeficiente é a alternativa posicionada mais próxima do quadrante superior direito do gráfico.

Figura 60: Matriz de Ecoeficiência das amostras analisadas



Fonte: Elaborado pela autora, 2016

A Matriz de Ecoeficiência apresenta os desempenhos ambiental e econômico das sete amostras analisadas nessa dissertação, tendo como objetivo uma abordagem berço ao berço.

A amostra S<sub>PEAD</sub>, representada pela sacola de polietileno de alta densidade é a alternativa apontada na Matriz de Ecoeficiência como a mais ecoeficiente, enquanto que a amostra E<sub>60</sub>P<sub>40</sub>C<sub>0</sub>, representada pela sacola manufaturada com os filmes poliméricos desenvolvidos sem a incorporação de Carbonato de Cálcio é a alternativa menos ecoeficiente.

É possível concluir que, dentre as sacolas manufaturadas com polímeros biodegradáveis, a incorporação de Carbonato de Cálcio favoreceu os desempenhos econômico e ambiental. Com relação ao desempenho econômico, foi observado que o teor de CaCO<sub>3</sub> adicionado na mistura diminuiu consideravelmente os impactos econômicos da amostra. Esse comportamento é observado no eixo horizontal do gráfico, onde a amostra E<sub>60</sub>P<sub>40</sub>C<sub>0</sub> (0% de CaCO<sub>3</sub>) encontra-se à esquerda do gráfico, representando a amostra com maior impacto econômico, enquanto que a amostra E<sub>60</sub>P<sub>20</sub>C<sub>20</sub> (20% de CaCO<sub>3</sub>) encontra-se à direita do gráfico, representando a amostra com menor impacto econômico. Sobre o desempenho ambiental, tendo como

referência o eixo vertical do gráfico, é observado que a incorporação da carga promoveu uma pequena, porém considerável, diminuição do impacto ambiental, demonstrando que as alternativas com maiores teores da carga mineral são mais ecoeficientes do que a manufaturada com o polímero biodegradável puro. Esse comportamento também pode ser vista na Impressão Ambiental, apresentada anteriormente.

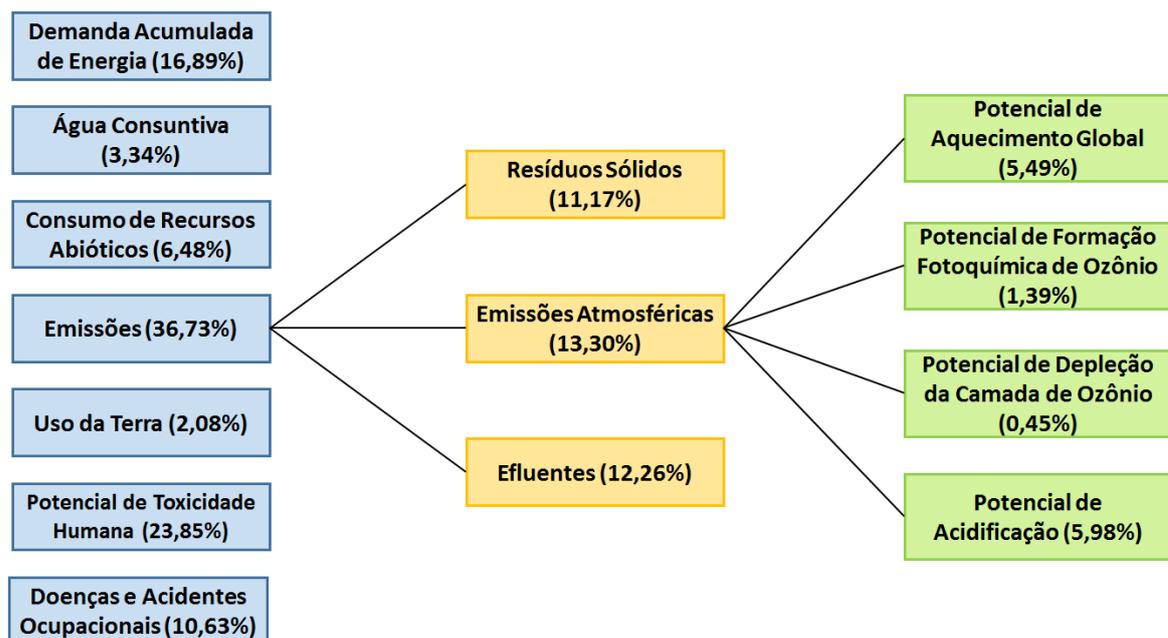
As amostras  $E_{60}P_{30}C_{10}$  e  $E_{70}P_{20}C_{10}$  apresentaram desempenhos ambientais e econômicos semelhantes, deixando assim a amostra  $E_{70}P_{20}C_{10}$  sobreposta à amostra  $E_{60}P_{30}C_{10}$  (esfera pontilhada).

Também é notado na Matriz de Ecoeficiência que a amostra  $S_{KRAFT}$  apresentou um dos mais baixos impactos econômicos, principalmente em relação às amostras biodegradáveis, porém demonstrou o mais alto impacto ambiental, assim como evidenciado anteriormente na Impressão Ambiental.

#### 5.7.4 Fator de Relevância

Na Figura 61 são apresentados os Fatores de Relevância da Análise de Ecoeficiência do presente estudo.

**Figura 61: Fatores de Relevância da Análise de Ecoeficiência**



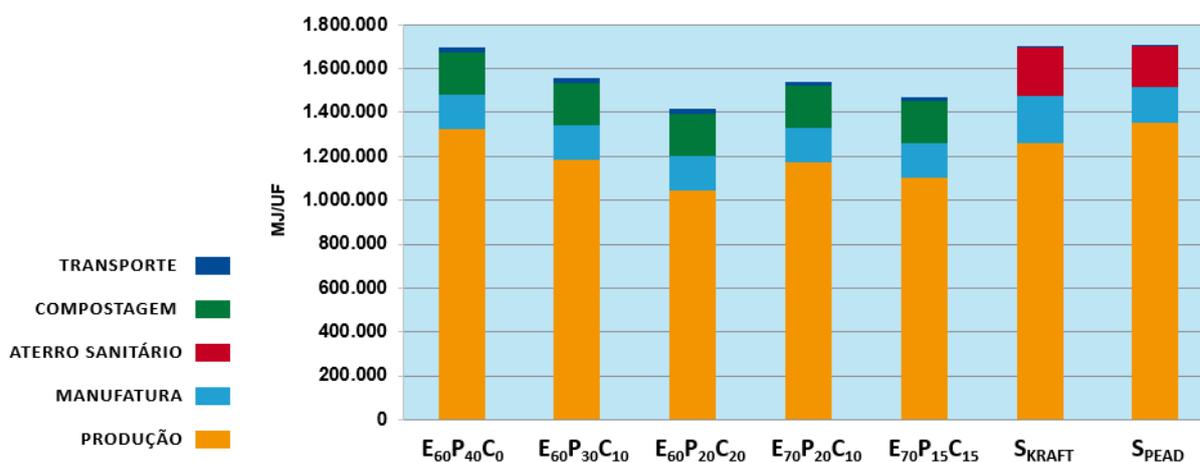
Fonte: Elaborado pela autora, 2016

Na Figura 61 é possível observar que as categorias de impacto ambiental mais relevantes para este estudo são: Emissões (36,73%), Potencial de Toxicidade Humana (23,85%) e Demanda Acumulada de Energia (16,89%). Enquanto que as categorias Uso da Terra (2,08%) e Água Consuntiva (3,34%) são as que apresentaram menor relevância para o estudo.

### 5.7.5 Demanda Acumulada de Energia

Conforme ilustrado na Figura 62, os maiores impactos devidos à Demanda Acumulada de Energia, para todas as alternativas analisadas, apresentaram-se na fase de produção. Também é possível observar que a Demanda Acumulada de Energia na fase de manufatura é praticamente a mesma para todas as alternativas; isso se dá por conta do processo de manufatura que é semelhante em todos os casos estudados.

**Figura 62: Impactos apresentados na categoria de impacto ambiental Demanda Acumulada de Energia**



Fonte: Elaborado pela autora, 2016

A Demanda Acumulada de Energia na produção do papel kraft, matéria-prima da amostra S<sub>KRAFT</sub> atingiu o consumo de 1.260.964 MJ de energia por UF, sendo proveniente, principalmente, do petróleo.

A Tabela 29 apresenta a Demanda Acumulada de Energia, em MJ, para a produção de 64.706 kg/UF de papel, quantidade necessária para o atendimento da função do estudo.

**Tabela 29: Demanda Acumulada de Energia para a produção de papel kraft em MJ/UF**

<b>Energia</b>	<b>MJ/UF</b>
Carvão	24.119
Petróleo	98.861
Gás Natural	658.913
Nuclear	14.616
Lignita	266
Recursos Renováveis	222.722
Recursos Não-Renováveis	241.181
Outros	285
<b>Total</b>	<b>1.260.964</b>

Fonte: Elaborado pela autora, 2016

Para a produção de polietileno de alta densidade, a Demanda Acumulada de Energia atingiu 1.355.355 MJ/UF, predominando o consumo provindo do petróleo.

A Tabela 30 apresenta a Demanda Acumulada de Energia necessária para a produção de 20.139 kg/UF de PEAD, matéria-prima necessária para a produção da sacolas de polietileno de alta densidade.

**Tabela 30: Demanda Acumulada de Energia para a produção de polietileno de alta densidade em MJ/UF**

<b>Energia</b>	<b>MJ/UF</b>
Carvão	6.227
Petróleo	688.288
Gás Natural	570.336
Nuclear	3.536
Lignita	282
Recursos Renováveis	31.223
Recursos Não-Renováveis	55.747
Outros	283
<b>Total</b>	<b>1.355.355</b>

Fonte: Elaborado pela autora, 2016

A Tabela 31 apresenta a Demanda Acumulada de Energia para as alternativas representadas pelas sacolas manufaturadas com polímeros biodegradáveis em MJ/UF, na fase de produção.

**Tabela 31: Demanda Acumulada de Energia na fase de produção das sacolas manufaturadas com os filmes poliméricos desenvolvidos em MJ/UF**

<b>Consumo de Energia (MJ/UF)</b>	E <sub>60</sub> P <sub>40</sub> C <sub>0</sub>	E <sub>60</sub> P <sub>30</sub> C <sub>10</sub>	E <sub>60</sub> P <sub>20</sub> C <sub>20</sub>	E <sub>70</sub> P <sub>20</sub> C <sub>10</sub>	E <sub>70</sub> P <sub>15</sub> C <sub>15</sub>
	1.323.160	1.183.995	1.044.831	1.169.911	1.100.329

Fonte: Elaborado pela autora, 2016

Também é observado na Tabela 31, que as alternativas que possuem incorporação de Carbonato de Cálcio apresentaram menores consumos de energia acumulada até esta fase do ciclo de vida (fase de produção). Essa diferença se dá por conta do baixo consumo de energia na produção da carga mineral.

A Tabela 32 apresenta os consumos de energia necessários, em MJ, para a produção de CaCO<sub>3</sub> nas quatro alternativas que possuem adição da carga, onde predomina o consumo de energia derivada do petróleo.

**Tabela 32: Demanda Acumulada de Energia para a produção de CaCO<sub>3</sub> em MJ/UF**

<b>Consumo de Energia (MJ/UF)</b>	E <sub>60</sub> P <sub>30</sub> C <sub>10</sub>	E <sub>60</sub> P <sub>20</sub> C <sub>20</sub>	E <sub>70</sub> P <sub>20</sub> C <sub>10</sub>	E <sub>70</sub> P <sub>15</sub> C <sub>15</sub>
	1.601	3.203	1.601	2.402

Fonte: Elaborado pela autora, 2016

Na fase de compostagem, 97% do consumo de energia é decorrente do processo de compostagem dos resíduos sólidos orgânicos. A Tabela 33 apresenta o consumo de energia total para a compostagem das sacolas manufaturadas com polímeros biodegradáveis em conjunto com os resíduos sólidos orgânicos.

**Tabela 33: Demanda Acumulada de Energia na fase de compostagem das sacolas manufaturadas com os filmes poliméricos desenvolvidos em MJ/UF**

<b>Consumo de Energia</b>	E <sub>60</sub> P <sub>40</sub> C <sub>0</sub>	E <sub>60</sub> P <sub>30</sub> C <sub>10</sub>	E <sub>60</sub> P <sub>20</sub> C <sub>20</sub>	E <sub>70</sub> P <sub>20</sub> C <sub>10</sub>	E <sub>70</sub> P <sub>15</sub> C <sub>15</sub>
	190.584	189.966	189.348	189.966	189.657

Fonte: Elaborado pela autora, 2016

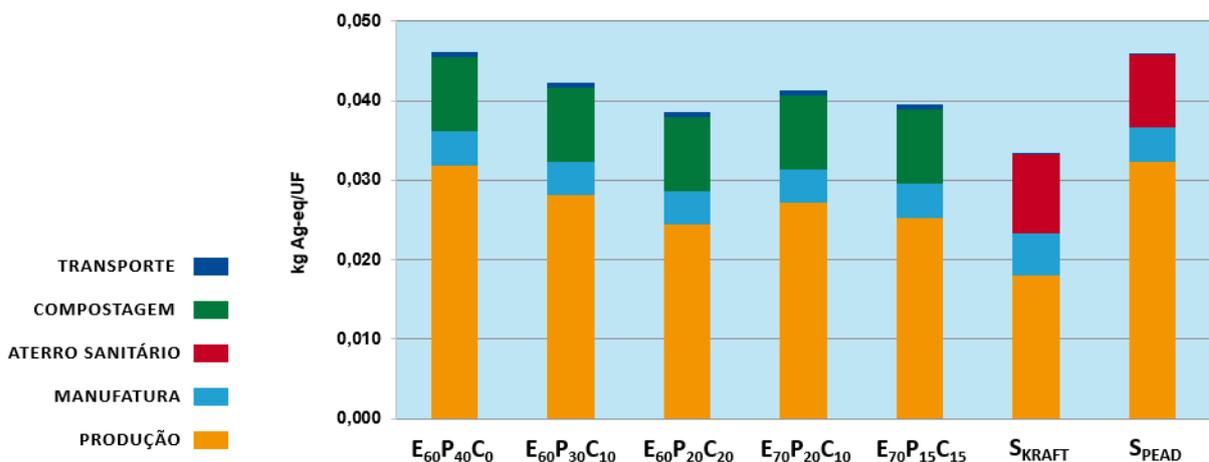
Na fase de aterro sanitário, o consumo de energia decorrente do processo de aterramento e decomposição dos resíduos sólidos orgânicos representou aproximadamente 87% do consumo total.

### 5.7.6 Consumo de Recursos Abióticos

Na categoria de Consumo de Recursos Abióticos, os maiores consumos estão relacionados à fase de produção das matérias-primas, principalmente das sacolas manufaturadas com polímeros biodegradáveis.

A Figura 63 apresenta o consumo de recursos abióticos das alternativas, por fase do ciclo de vida estudado.

**Figura 63: Impactos apresentados na categoria de impacto ambiental Consumo de Recursos Abióticos**



Fonte: Elaborado pela autora, 2016

Na fase de produção da amostra S<sub>KRAFT</sub> o consumo de recursos atingiu 72.297 kg/UF, onde o maior consumo é representado pelo gás natural, conforme Tabela 34.

**Tabela 34: Consumo de Recursos Abióticos da amostra S<sub>KRAFT</sub> em kg/UF**

<b>Recursos</b>	<b>kg/UF</b>
Carvão	832
Petróleo	2.299
Gás Natural	13.990
Lignita	25
Urânio	0,03
Cloreto de Sódio	965
Enxofre	0,93
Fósforo	70
Ferro	5
Calcário	271
Bauxita	95
Cobre	0
Titânio	0
Magnésio	0
Zinco	0
Prata	0

Fonte: Elaborado pela autora, 2016

Na fase de produção da amostra S<sub>PEAD</sub>, o consumo do petróleo é o mais relevante, conforme apresentado na Tabela 35.

**Tabela 35: Consumo de Recursos Abióticos da amostra S<sub>PEAD</sub> em kg/UF**

<b>Recurso</b>	<b>kg/UF</b>
Carvão	215
Petróleo	16.007
Gás Natural	12.109
Lignita	27
Urânio	0,01
Cloreto de Sódio	49
Enxofre	1
Fósforo	0
Ferro	2
Calcário	2
Bauxita	5
Cobre	0
Titânio	0
Magnésio	0
Zinco	0
Prata	0

Fonte: Elaborado pela autora, 2016

Nas sacolas manufaturadas com os filmes poliméricos desenvolvidos, o recurso com maior consumo na fase de produção foi o gás natural, seguido pelo petróleo. A Tabelas 36 apresenta o consumo total de gás natural e petróleo para cada alternativa.

**Tabela 36: Consumo de gás natural e petróleo na fase de produção das sacolas manufaturadas com os filmes poliméricos desenvolvidos em kg/UF**

<b>Amostras</b>	<b>Consumo de gás natural kg/UF</b>	<b>Consumo de petróleo kg/UF</b>
E <sub>60</sub> P <sub>40</sub> C <sub>0</sub>	20.187	6.512
E <sub>60</sub> P <sub>30</sub> C <sub>10</sub>	17.743	5.713
E <sub>60</sub> P <sub>20</sub> C <sub>20</sub>	15.299	4.914
E <sub>70</sub> P <sub>20</sub> C <sub>10</sub>	17.030	5.423
E <sub>70</sub> P <sub>15</sub> C <sub>15</sub>	15.808	5.024

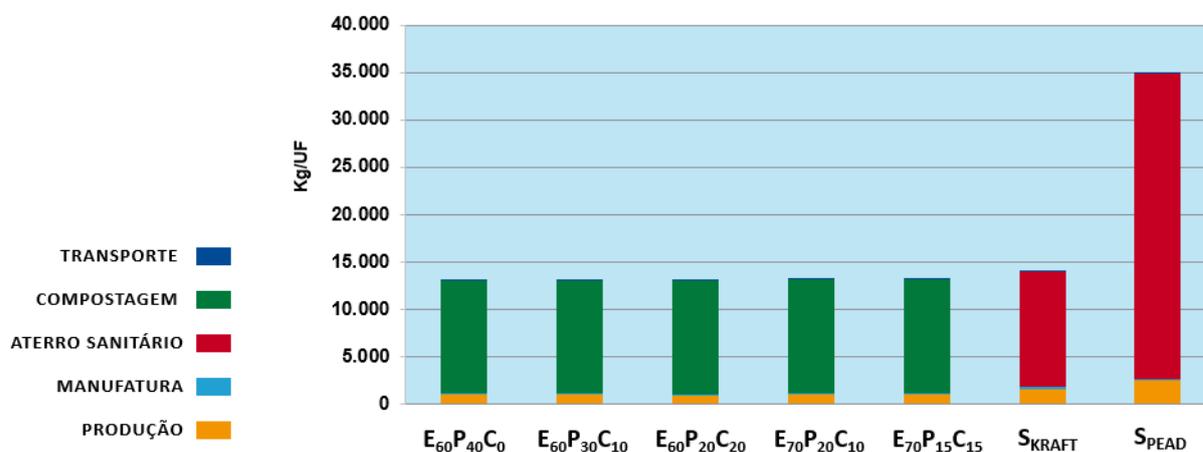
Fonte: Elaborado pela autora, 2016

Na Tabela 36 é evidenciado que quanto maior o teor de Carbonato de Cálcio incorporado na amostra, menor é o consumo dos recursos gás natural e petróleo.

### 5.7.7 Resíduos Sólidos

Na categoria de impacto ambiental Resíduos Sólidos, a maior parte dos impactos foram apresentados na fase de destinação final: compostagem e aterro sanitário, conforme mostrado na Figura 64.

**Figura 64: Impactos apresentados na categoria de impacto ambiental Resíduos Sólidos**



Fonte: Elaborado pela autora, 2016

É possível observar que a amostra S<sub>PEAD</sub> possui a maior emissão de resíduos sólidos na fase de destinação final, representada pelo aterro sanitário. Essa emissão ocorre por conta da baixa degradabilidade da sacola de polietileno de alta densidade, sendo que, levando em consideração a fronteira temporal de um ano, as sacolas permanecem intactas no aterro sanitário, sendo então consideradas como resíduos sólidos e não sendo convertidas a outras emissões (estados líquido ou gasoso).

Para a fase de destinação final da amostra S<sub>PEAD</sub>, a emissão de resíduos sólidos foi de 20.139 kg de resíduo municipal por Unidade Funcional. Já na fase de produção da matéria-prima (segunda fase mais impactante), foi observada uma grande quantidade de resíduos gerados, conforme Tabela 37.

**Tabela 37: Resíduos Sólidos na fase de produção da amostra S<sub>PEAD</sub> em kg/UF**

<b>Resíduo Sólido</b>	<b>kg/UF</b>
Resíduo Municipal	1.000
Resíduo Industrial	252
Resíduo Radioativo	0
Resíduo de Construção	0
Resíduo de Mineração	63

Fonte: Elaborado pela autora, 2016

Diferentemente da amostra S<sub>PEAD</sub>, que apresentou a maior emissão de resíduos sólidos, as demais amostras não apresentaram grandes impactos na fase de destinação final. Esse comportamento se dá por conta da rápida degradação das demais sacolas, onde os resíduos foram transformados em emissões atmosféricas durante a fronteira temporal considerada no estudo.

Na fase de produção da amostra S<sub>KRAFT</sub>, os resíduos municipais e de mineração foram os mais representativos. A Tabela 38 apresenta a emissão de resíduos sólidos na produção de 64.706 kg de papel kraft, quantidade necessária para atendimento à função do estudo.

**Tabela 38: Resíduos Sólidos na fase de produção da amostra S<sub>KRAFT</sub> em kg/UF**

<b>Resíduo Sólido</b>	<b>kg/UF</b>
Resíduo Municipal	415
Resíduo Industrial	177
Resíduo Radioativo	0
Resíduo de Construção	0
Resíduo de Mineração	782

Fonte: Elaborado pela autora, 2016

Nas sacolas manufaturas com os filmes poliméricos desenvolvidos, a maior emissão também foi na fase de produção, representada pela produção dos polímeros biodegradáveis e do Carbonato de Cálcio. Na produção dos polímeros biodegradáveis, as emissões que mais se destacaram foram as de resíduos industriais, de mineração e principalmente de resíduos municipais. Por outro lado, os

resíduos de mineração foram os que mais se destacaram na produção do  $\text{CaCO}_3$ , conforme demonstrado na Tabela 39.

**Tabela 39: Resíduos Sólidos na produção do  $\text{CaCO}_3$  em kg/UF**

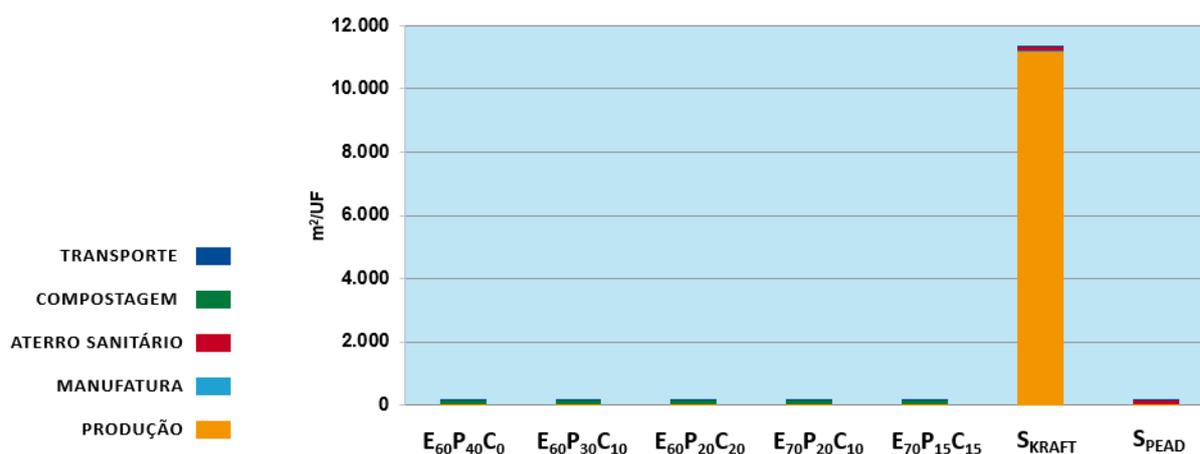
Resíduo Sólido	E <sub>60</sub> P <sub>30</sub> C <sub>10</sub>	E <sub>60</sub> P <sub>20</sub> C <sub>20</sub>	E <sub>70</sub> P <sub>20</sub> C <sub>10</sub>	E <sub>70</sub> P <sub>15</sub> C <sub>15</sub>
Resíduo Municipal	0,80	1,59	0,80	1,20
Resíduo Industrial	1,09	2,18	1,09	1,63
Resíduo Radioativo	0	0	0	0
Resíduo de Construção	0	0	0	0
Resíduo de Mineração	188	376	188	282

Fonte: Elaborado pela autora, 2016

### 5.7.8 Uso da Terra

Na Figura 65 são apresentados os impactos decorrentes da categoria de impacto ambiental Uso da Terra, onde é possível observar que, dentre todas alternativas analisadas, a amostra S<sub>KRAFT</sub> apresentou o maior impacto ambiental.

**Figura 65: Impactos apresentados na categoria de impacto ambiental Uso da Terra**



Fonte: Elaborado pela autora, 2016

O maior impacto da amostra S<sub>KRAFT</sub> está apresentado na fase de produção, ocupando uma área total de 2.496 m<sup>2</sup>/UF.

Na Tabela 40 é apresentada a ocupação de área total para produção de 64.706 kg de papel kraft por UF.

**Tabela 40: Uso da Terra da amostra S<sub>KRAFT</sub> em m<sup>2</sup>/UF**

<b>Uso da Terra</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidade</b>
Área urbana	0,07	m <sup>2</sup>
Área industrial	83,18	m <sup>2</sup>
Área de tráfego	1,18	m <sup>2</sup>
Local de extração mineral	4,51	m <sup>2</sup>
Local de despejo	4,32	m <sup>2</sup>
Terra arável	2.368,26	m <sup>2</sup>
Terra arável, intensiva	0,00	m <sup>2</sup>
Terra arável, não irrigada	0,01	m <sup>2</sup>
Terra de cultura permanente	0,00	m <sup>2</sup>
Terra de prados e pastagens	0,00	m <sup>2</sup>
Floresta	29,69	m <sup>2</sup>
Matagal	0,00	m <sup>2</sup>
Áreas úmidas	4,96	m <sup>2</sup>

Fonte: Elaborado pela autora, 2016

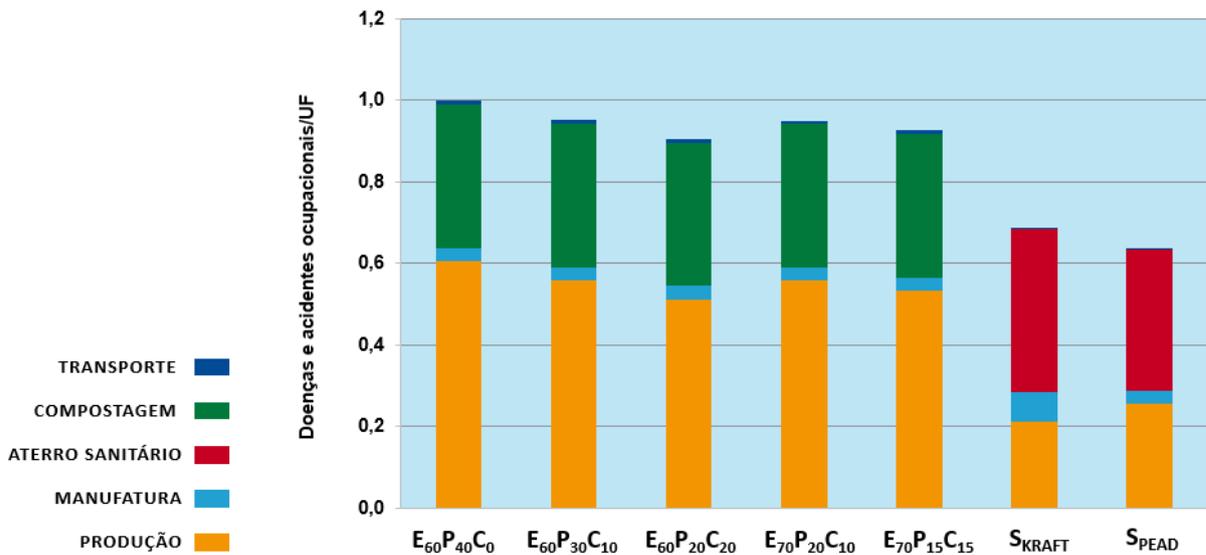
O maior Uso da Terra é feito em terras aráveis, com ocupação de 2.368 m<sup>2</sup> de área por Unidade Funcional, sendo essa decorrente, principalmente, da plantação de eucaliptos, matéria-prima para a produção do papel kraft.

A categoria de Uso da Terra tem grande importância e interfere muito em termos de políticas públicas na produção extrativa do eucalipto. De acordo com Vieira et al. (2010), o eucalipto, que é a principal matéria-prima do papel, apresenta altos impactos em termos de Avaliação do Ciclo de Vida. Por isso, no Brasil, há novos estudos relacionados à redução desse impacto, focando principalmente no reaproveitando esse recurso natural (COOK et al, 2016).

### 5.7.9 Doenças e Acidentes Ocupacionais

Na categoria de impacto de Doenças e Acidentes Ocupacionais, é observado que a maior parte destes está atribuída à fase de produção no ciclo de vida, predominando nos polímeros biodegradáveis, conforme ilustrado na Figura 66.

**Figura 66: Impactos apresentados na categoria de impacto ambiental Doenças e Acidentes Ocupacionais**



Fonte: Elaborado pela autora, 2016

Na fase de produção, os resultados de todas as alternativas apresentaram maiores impactos na quantidade de acidentes de trabalho, pequenas ocorrências em doenças ocupacionais e nenhuma ocorrência na quantidade de acidentes fatais.

A Tabela 41 apresenta em ocorrências por Unidade Funcional a quantidade de doenças e dos acidentes ocupacionais na fase de produção dos polímeros biodegradáveis.

**Tabela 41: Doenças e Acidentes Ocupacionais na fase de produção dos polímeros biodegradáveis por amostra em ocorrências/UF**

<b>Amostras</b>	<b>Acidentes de trabalho</b>	<b>Acidentes fatais</b>	<b>Doenças ocupacionais</b>
E <sub>60</sub> P <sub>40</sub> C <sub>0</sub>	0,0124	0	0,0007
E <sub>60</sub> P <sub>30</sub> C <sub>10</sub>	0,0120	0	0,0006
E <sub>60</sub> P <sub>20</sub> C <sub>20</sub>	0,0116	0	0,0006
E <sub>70</sub> P <sub>20</sub> C <sub>10</sub>	0,0126	0	0,0006
E <sub>70</sub> P <sub>15</sub> C <sub>15</sub>	0,0124	0	0,0006

Fonte: Elaborado pela autora, 2016

Dentre as alternativas analisadas, a amostra S<sub>KRAFT</sub> foi a que teve o maior impacto na fase de manufatura. A Tabela 42 apresenta os resultados em ocorrências por Unidade Funcional das doenças e dos acidentes ocupacionais na fase de manufatura da amostra S<sub>KRAFT</sub>.

**Tabela 42: Doenças e Acidentes Ocupacionais na fase de manufatura da amostra S<sub>KRAFT</sub> em ocorrências/UF**

<b>Categoria</b>	<b>Números/UF</b>
Acidentes de trabalho	0,0003634
Acidentes fatais	0,0000004
Doenças ocupacionais	0,0000863

Fonte: Elaborado pela autora, 2016

É observado na Tabela 42 que a fase de manufatura da amostra S<sub>KRAFT</sub> apresentou o maior número de ocorrências na categoria de acidentes de trabalho.

## 5.8 Cenário da Análise de Ecoeficiência

Uma vez identificados os pontos críticos e/ou oportunidades de melhoria dos estudos, ou ainda a possibilidade de aplicação de diferentes tecnologias para o mesmo fim, é possível estabelecer cenários que contemplem alterações dos dados do sistema de produto e, assim, avaliar a performance em ecoeficiência esperada para o sistema nesta nova condição.

Nesse cenário foi considerado que o preço da unidade da sacola de papel kraft, da sacola de polietileno de alta densidade e da sacola manufaturada com polímero biodegradável (sem incorporação de  $\text{CaCO}_3$ ) fosse o mesmo. Os demais custos (transportes, disposição final, etc.) se mantiveram de acordo com a realidade, embora se houvesse maior consumo dos materiais biodegradáveis o custo de transporte destes poderiam ser reduzidos.

Na Tabela 43 é possível observar o preço para se obter uma unidade de sacola atualmente (dados que foram utilizados durante todo estudo da Análise de Ecoeficiência) e o preço para se obter uma unidade de sacola considerado no cenário, todos valores ajustados segundo o valor do preço da sacola de PEAD.

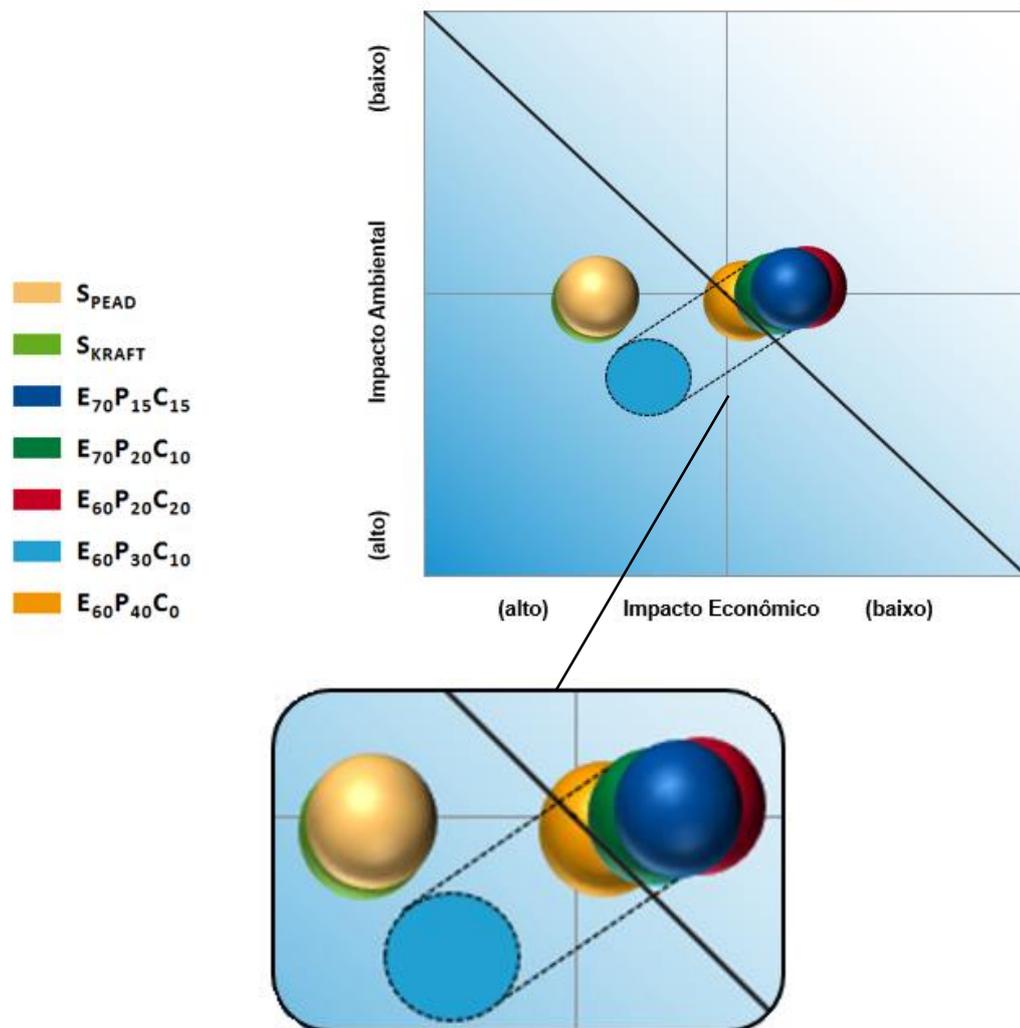
**Tabela 43: Preço da unidade da sacola atualmente e considerando o cenário**

<b>Amostra</b>	<b>Preço da unidade</b>	<b>Preço da unidade (Cenário)</b>
E <sub>60</sub> P <sub>40</sub> C <sub>0</sub>	0,1440	0,0590
E <sub>60</sub> P <sub>30</sub> C <sub>10</sub>	0,1296	0,0531
E <sub>60</sub> P <sub>20</sub> C <sub>20</sub>	0,1152	0,0472
E <sub>70</sub> P <sub>20</sub> C <sub>10</sub>	0,1296	0,0531
E <sub>70</sub> P <sub>15</sub> C <sub>15</sub>	0,1224	0,0501
SKRAFT	0,0720	0,0590
SPEAD	0,0590	0,0590

Fonte: Elaborado pela autora, 2016

A Matriz de Ecoeficiência do cenário estabelecido pode ser visualizada na Figura 67.

**Figura 67: Matriz de Ecoeficiência do cenário estabelecido**



Fonte: Elaborado pela autora, 2016

Na Matriz de Ecoeficiência do cenário estabelecido é possível perceber que se as sacolas custassem o mesmo valor, as sacolas manufaturadas com os filmes poliméricos desenvolvidos seriam mais ecoeficientes. Até mesmo a amostra  $E_{60}P_{40}C_0$ , que não possui incorporação de Carbonato de Cálcio, se mostrou mais ecoeficiente do que as sacolas de papel kraft e de polietileno de alta densidade.

Também foi observado no cenário realizado que, quanto maior o teor de carga incorporado, mais ecoeficiente a amostra se torna, conforme demonstrado no detalhamento da Figura 67.

Portanto, o cenário apresenta a amostra E<sub>60</sub>P<sub>20</sub>C<sub>20</sub> (sacola manufaturada com polímeros biodegradáveis e com 20% de Carbonato de Cálcio) como a mais ecoeficiente. O cenário também apresentou a sacola de papel kraft como a sacola menos ecoeficiente, seguida da sacola de polietileno de alta densidade.

Porém, como a Análise de Ecoeficiência baseia-se na avaliação de impactos ambientais vinculados aos impactos econômicos, é necessário que a alternativa atenda às duas vertentes, ambiental e econômica, para que se possa afirmar que possui um desempenho ambiental-econômico mais favorável que as alternativas em comparação.



## 6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Caracterizando as sete amostras estudadas, pode-se concluir que os filmes poliméricos biodegradáveis apresentaram grandes vantagens para substituição do polímero biodegradável puro, principalmente no ponto de vista econômico.

Os resultados do ensaio mecânico demonstraram que a incorporação de  $\text{CaCO}_3$  nos filmes diminuiu o alongamento na ruptura e a resistência máxima à tração dos materiais, porém aumentou o Módulo de Young. Portanto, pode-se concluir que a incorporação da carga tornou os materiais mais rígidos .

Nos resultados do ensaio de ângulo de contato foi possível observar que todas as amostras apresentaram ângulos menores que  $90^\circ\text{C}$ . Ou seja, todas as amostras apresentaram caráter levemente hidrofílico. Também foi observado que a incorporação de Carbonato de Cálcio aumentou a hidrofobicidade das amostras.

No ensaio de sorção, foi observado que as amostras representadas pelos filmes desenvolvidos tiveram pequenos percentuais de massa sorvida durante as 336 horas ensaiadas. A amostra SPEAD apresentou resultado similar às amostras representadas pelos filmes. Por outro lado, a amostra SKRAFT foi a amostra que apresentou o maior percentual de massa sorvida.

Nos resultados da Análise Termogravimétrica foi observado que a incorporação de Carbonato de Cálcio favoreceu a interação dos polímeros PLA e PBAT, conforme também observado nos resultados de MEV. Também foi verificado, nos resultados das curvas de DTG, que a incorporação de  $\text{CaCO}_3$  reduziu a temperatura máxima de taxa de degradação das amostras.

As amostras com  $\text{CaCO}_3$  não apresentaram nítidas separação de fases, diferentemente da amostra sem carga, demonstrando que a incorporação do material favoreceu a interação de PBAT com PLA.

A amostra sem Carbonato de Cálcio apresentou nítidas separação de fases, diferentemente das amostras que possuem a carga. A incorporação de Carbonato de Cálcio também preencheu a maior parte dos poros observados na amostra sem carga, evidenciando que a incorporação de  $\text{CaCO}_3$  favoreceu a dispersão e interação do PLA com o PBAT.

As amostras representadas pelos filmes poliméricos desenvolvidos absorveram uma quantidade menor de água do que as demais amostras, durante o ensaio de sorção, o que poderá interferir, no processo de biodegradação a longo prazo.

Após 360 dias do ensaio de biodegradação em solo simulado, os resultados mostraram que não houve uma grande perda de massa inicial, no entanto, as fotomicrografias realizadas com microscópio óptico demonstraram que houve uma ação de micro-organismos na superfície das amostras, quando observadas fissuras, eventuais rachaduras, perda de brilho e escurecimento.

Os resultados dos Fatores de Relevância da Análise de Ecoeficiência mostraram que as categorias ambientais mais relevantes foram: Emissões (36,73%), Potencial de Toxicidade Humana (23,85%) e Demanda Acumulada de Energia (16,89%), ou seja, essas categorias foram as que mais contribuíram para o impacto geral no escopo estudado.

A Análise de Ecoeficiência apresentou a sacola de polietileno de alta densidade como a mais ecoeficiente e a sacola manufaturada com os polímeros biodegradáveis sem Carbonato de Cálcio como a menos ecoeficiente.

Um aspecto importante a ser considerado é que a incorporação de Carbonato de Cálcio apresentou grande vantagem econômica devido à redução do custo do material, ou seja, quanto maior era o teor da carga na amostra, menor o impacto econômico. Também foi observado que a incorporação da carga reduziu, ainda que levemente, os impactos ambientais apresentados ao longo do ciclo de vida. Portanto, pode-se concluir que a ecoeficiência das amostras é melhorada a medida que se aumenta o teor de  $\text{CaCO}_3$  presente na amostra.

A sacola de papel kraft, apesar de demonstrar uma rápida biodegradação e um custo acessível, apresentou impactos ambientais menos satisfatórios, quando comparada às demais alternativas, principalmente nas categorias Uso da Terra e Emissões.

A sacola de polietileno de alta densidade, apesar de apresentar o menor impacto econômico, demonstrou impactos ambientais maiores que as sacolas manufaturas com os polímeros biodegradáveis em três categorias: Demanda Acumulada de Energia, Emissões e Consumo de Recursos Abióticos.

Nos resultados da Análise de Ecoeficiência do cenário proposto, foi possível concluir que a ecoeficiência das sacolas manufaturadas com polímeros biodegradáveis está relacionada, principalmente, ao alto custo de comercialização destas. Se as sacolas biodegradáveis custassem o mesmo valor de uma sacola produzida com um material *commodity*, no caso dessa dissertação o polietileno de

alta densidade, elas seriam mais ecoeficientes, pois o desempenho ambiental que elas apresentam é superior às alternativas de PEAD e papel kraft.

Por fim, pode-se concluir que as sacolas manufaturas com polímeros biodegradáveis seriam mais ecoeficientes se tivessem um melhor custo de comercialização. Além disso, essas sacolas colaboram com o desenvolvimento sustentável: reduzindo a quantidade de resíduos sólidos orgânicos e de sacolas descartáveis que vão para aterros sanitários; reduzindo a poluição do solo, do ar e da água; reduzindo a quantidade de fertilizantes sintético, com a utilização da turfa e do fertilizante orgânico obtido com o processo compostagem; além da possibilidade de se obter ganho financeiro com a venda da turfa e do fertilizante orgânico obtido.



## 7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABIPLAST. **Perfil da Indústria Brasileira de Transformados Plásticos 2015**. Disponível em: < [http://file.abiplast.org.br/download/2016/perfil\\_2015.pdf](http://file.abiplast.org.br/download/2016/perfil_2015.pdf) >. Acesso em: 20 de novembro de 2016.

ABRELPE – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS. **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil – 2015**. Disponível em: < <http://www.abrelpe.org.br/Panorama/panorama2015.pdf> >. Acesso em: 15 de novembro de 2016.

ADAMCOVA, D.; VAVERKOVA, M. **Biodegradation of Degradable/ Biodegradable Plastic Material in Controlled Composting Environment**. Polish Journal of Environmental Studies, v. 23, n. 5, p. 1465-1474, 2014.

AKATU Consumo Consciente para um Futuro Sustentável. **Relatório de Atividades 2011**. Disponível em: < <http://www.akatu.org.br/Content/Akatu/Arquivos/file/relatorio-de-atividades-2011.pdf>>. Acesso em 20 junho 2016.

ALLESCH, A.; BRUNNER, P. **Assessment Methods for Solid Waste Management: A Literature Review**. Waste Management and Research, v. 32, n. 6, p. 461-473, 2014.

ALMEIDA, C.B. **Características Estruturais E Funcionais De Biofilmes Produzidos Com Zeína E Óleos Vegetais Comestíveis**. 2010. 133 f. Tese (Doutorado em Engenharia e Ciência de Alimentos), Universidade Estadual Paulista Julio de Mesquita Filho, 2010.

ALVAREZ, J.V.L.; LARRUCEA, M.A.; BERMÚDEZ, A.; CHICOTE, B.L. **Biodegradation of paper waste under controlled composting conditions**. Waste Management, v. 29, p. 1514-1519, 2009.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS – ASTM. – D882-12 **Standard Test Method for Tensile Properties of Thin Plastic Sheeting**, Annual Book of ASTM Standards, Philadelphia (2012).

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS – ASTM. – D883-12 **Standard Terminology Relating to Plastics**, Annual Book of ASTM Standards, Philadelphia, 2012.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS – ASTM – G21-09 **Standard Practice for Determining Resistance of Synthetic Polymeric Materials to Fungi**, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2009.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS – ASTM - G22-76(1996), **Standard Practice for Determining Resistance of Plastics to Bacteria** (Withdrawn 2002), ASTM International, West Conshohocken, PA, 1996.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS – ASTM G160-12, **Standard Practice for Evaluating Microbial Susceptibility of Nonmetallic Materials By Laboratory Soil Burial**, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2012.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS – ASTM - D5338-15, **Standard Test Method for Determining Aerobic Biodegradation of Plastic Materials Under Controlled Composting Conditions, Incorporating Thermophilic Temperatures**, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2015.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS – ASTM - D5988-12, **Standard Test Method for Determining Aerobic Biodegradation of Plastic Materials in Soil**, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2012.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS – ASTM - D6002-96(2002)e1, **Standard Guide for Assessing the Compostability of Environmentally Degradable Plastics** (Withdrawn 2011), ASTM International, West Conshohocken, PA, 1996.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS - ASTM D6400-12, **Standard Specification for Labeling of Plastics Designed to be Aerobically**

**Composted in Municipal or Industrial Facilities**, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2012.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS - ASTM D6868-11, **Standard Specification for Labeling of End Items that Incorporate Plastics and Polymers as Coatings or Additives with Paper and Other Substrates Designed to be Aerobically Composted in Municipal or Industrial Facilities**, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2011.

ANDRADE, M.F.C.; SOUZA, P.M.S.; CAVALETT, O.; MORALES, A.R. **Life Cycle Assessment of Poly(Lactic Acid) (PLA): Comparison Between Chemical Recycling, Mechanical Recycling and Composting**. Journal of Polymers and the Environment, v. 24, n. 4, p. 372-384, 2016.

ARRUDA, L.C.; MAGATON, M.; BRETAS, R.E.S.; MASSAYOSHI, M. **Influence of Chain Extender on Mechanical, Thermal and Morphological Properties of Blown Films of PLA/PBAT Blends**. Polymer Testing, v. 43, p. 27-37, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **MB-1167, Método da liga de Raney: Fertilizante - Determinação de nitrogênio total**: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1991.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR ISO 14040: Gestão ambiental: avaliação do ciclo de vida: princípios e estrutura**. Rio de Janeiro, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR ISO 14044: Gestão ambiental: avaliação do ciclo de vida: requisitos e orientações**. Rio de Janeiro, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR ISO 14045: Gestão ambiental: avaliação da ecoeficiência de sistemas de produto: princípios, requisitos e orientações**. Rio de Janeiro, 2012.

BARDI, M.A.G.; ROSA, D.S. **Avaliação da biodegradação em solo simulado de poli ( $\epsilon$ -caprolactona), acetato de celulose e suas blendas**. Revista Brasileira de Aplicações de Vácuo, São Paulo, v. 26, n. 1, p.43-47, 2007.

BASF, The Chemical Company. **What is Eco-Efficiency?** 2013. Disponível em: <[http://www.basf.com/group/corporate/en\\_GB/sustainability/eco-efficiency-analysis/whatis](http://www.basf.com/group/corporate/en_GB/sustainability/eco-efficiency-analysis/whatis)>. Acesso em: 11 mai. 2015.

BASTIOLI, C. **Handbook of Biodegradable Polymers**. United Kingdom, 2014, 2ª Edição.

BILCK, A.P.; GROSSMANN, M.V.E.; YAMASHITA, F. **Biodegradable mulch films for strawberry production**. Polymer Testing, v. 29, n. 4, p. 471-476, 2010.

BOSCARO, M.E. Determinação de elementos químicos em plásticos biodegradáveis naturais e sintéticos. 2014. 76f. Dissertação Mestrado em Ciências, Universidade de São Paulo, 2014.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos, **Lei Nº 12.305, de 2 de agosto de 2010. Diário Oficial da República Federativa do Brasil: Poder Legislativo, Brasília, DF, 3 ago. 2010.**

BRASIL. Câmara dos Deputados. Comissão de Defesa do Consumidor, Meio Ambiente e Minorias. **Conferência das Nações Unidas sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento: Agenda 21**. Brasília: 1995.

BRASKEM. **Catálogo Braskem – Poliolefinas Eteno**. Disponível em:<[http://www.etenos.com.br/downloadDoc.php?d=arqConteudo/arqProduto&f=Catalogo\\_Braskem.pdf](http://www.etenos.com.br/downloadDoc.php?d=arqConteudo/arqProduto&f=Catalogo_Braskem.pdf)>. Acesso em: 10 de novembro de 2016.

BRINE T.O; THOMPSON, R.C. **Degradation of plastic carrier bags in the marine environment**. Marine Pollution Bulletin, v. 60, n. 12, p. 2279-2283, 2010.

BRITO, G.F.; AGRAWAL, P.; ARAÚJO, E.M.; MÉLO, T.J.A. **Biopolímeros, Polímeros Biodegradáveis e Polímeros Verdes**. Revista Eletrônica de Materiais e Processos, v. 6, n. 2, p.127-139, 2011.

CALLISTER, W. D. **Ciência e Engenharia de Materiais - Uma Introdução**. LTC, 2008. ISBN 9788521615958.

CANDELORIO, P.D. **Avaliação de compósitos de poliuretana de mamona e vidros bioativos dopados, com e sem prata, como material protético**. 2011. 97p. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-graduação em Saúde e Desenvolvimento – Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, MS, 2011.

CARVALHO, F.P.A.; GOMES, J.M.A. **Eco eficiência na produção de cera de Carnaúba no município de Campo Maior, Piauí, 2004**. v. 46, n. 2, 2008.

CASARIN, S.A.; AGNELLI, J.A.M.; MALMONGE, S.M.; ROSÁRIO, F. **Blendas PHB/copoliésteres biodegradáveis: biodegradação em solo**. Polímeros, v. 23, n. 1, 2013.

CHEHEBE, J.R.. **Análise do ciclo de vida de produtos: Ferramenta gerencial da ISO 14000**. Rio de Janeiro: Qualitymark, 1997.

COLTELLI, M.B.; MAGGIORE, I.D.; BERTOLDO, M.; SIGNORI, F.; BRONCO, S.; CIARDELLI, F. **Poly(lactic acid) Properties as a Consequence of Poly(butylene adipate-co-terephthalate) Blending and Acetyl Tributyl Citrate Plasticization**. Journal of Applied Polymer Science. v. 110, p. 1250–1262, 2008.

COLTRO, L.; DUARTE, L.C. **Reciclagem de Embalagens Plásticas Flexíveis: Contribuição da Identificação Correta**. Polímeros, v. 23, n.1, p. 128-134, 2013.

COOK, R.L.; BINKLEY, D.; STAPE, J. L. **Eucalyptus plantation effects on soil carbon after 20 years and three rotations in Brazil**. Forest Ecology and Management, v. 359, p. 92-98, 2016.

COSTA, C.Z.; ALBULQUERQUE, M.C.C.; BRUM, M.C.; CASTRO, A.M. **Degradação Microbiológica E Enzimática De Polímeros: Uma Revisão**. Química Nova, v. 38, n. 2, p. 259-267, 2015.

DAVIS, G.; SONG, J.H. **Biodegradable packaging based on raw material from crops and their impact on waste management**. Industrial Crops and Products. v. 23, n. 2, p. 147-161, 2006.

DE PAOLI, M.A. **Degradação e Estabilização de Polímeros**. São Paulo: Editora Artliber, 2008. 286p.

DIAZ, M.B. **Proibição do uso de sacolas plásticas na cidade de São Paulo e a experiência em outras localidades do Brasil. Substituição por sacolas oxibiodegradáveis e biodegradáveis**, São Paulo. RevInter Revista Intertox de Toxicologia, Risco Ambiental e Sociedade, v. 4, n. 2, p. 152-162, 2011.

DMITRIJEVAS, C. **Análise de ecoeficiência de técnicas para tratamento e disposição de resíduos sólidos urbanos**. 2010. 131p. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação Stricto Sensu em Ciências na área de Tecnologia Nuclear – Materiais, Instituto de Pesquisa Energéticas e Nucleares – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2010.

ESSABIR H; BENSALAH M.O.; RODRIGUE D.; BOUHFID R.; QAISS A. **A comparison between bio-and mineral calcium carbonate on the properties of polypropylene composites**. Construction and Building Materials, v. 134, p. 549-555, 2017.

EVSTATIEV, M.; SIMEONOVA, K.; FRIEDRICH, K.; PEI, X.Q.; FORMANEK, P. **MFC-structured biodegradable poly(L-lactide)/poly(butylene adipate-co-terephthalate) blends with improved mechanical and barrier properties**. JOURNAL OF MATERIALS SCIENCE. V, 48, p. 6312-6330, 2013.

FORLIN, F.J.; FARIA, J.A.F. **Considerações Sobre a Reciclagem de Embalagens Plásticas**. *Polímeros Ciência e Tecnologia*, vol. 12, n.1, p. 1-10, 2002.

FRANCHETTI, S.M.M.; MARCONATO, J.C. **Biodegradable polymers – a partial way for decreasing the amount of plastic waste**. *Química Nova*, v. 29, n. 4, on-line version, 2006.

GARAY, A.C. **Efeito da Adição de Carbonato de Cálcio em Compósitos Poliméricos Moldados por RTM e RTM Light**. 2010. 92 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Brasil, 2010.

GARDASZ; R. **As sacolas plásticas e as alternativas tecnológicas para redução do impacto ambiental**. 2012. Monografia (Licenciatura em Ciências Biológica). Centro de Ciências Biológicas. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2012.

GASI, T.M.T.; FERREIRA, E. Produção mais limpa. In: VILELA. JR, A., DEMAJOROVIC, J. **Gestão Ambiental: desafios e perspectivas para as organizações**. 2.ed.São Paulo: Senac, 2006. 439 p.

GEORGIOPOULOS, P.; KONTOU, E.; NIAOUNAKIS, M. **Thermomechanical Properties and Rheological Behavior of Biodegradable Composites**. *Polymer Composites*, v. 35, n. 6, p. 1140-1149, 2014.

GOMES, L.P.; KOHL, C.A.; SOUZA, C.L.L.; REMPEL, N.; MIRANDA, L.A.S.; MORAES, C.A.M. **Avaliação ambiental de aterros sanitários de resíduos sólidos urbanos precedidos ou não por unidades de compostagem**. *Engenharia Sanitária e Ambiental*, v. 20, n.3, p. 449-462, 2015.

GORDOBIL, O.; DELUCIS, R.; EGÜÉS, I.; LABIDI, J. **Kraft lignin as filler in PLA to improve ductility and thermal properties**. *Industrial Crops and Products*, v. 72, p. 46-53, 2015.

GUIMARÃES, Y.B.T.; NOHARA, J.J.; SOUZA, M.T.S. **Tendências Tecnológicas em Sacolas Descartáveis: Uma Análise do Depósito de Patentes de Biopolímeros**. Simpósio de Gestão da Inovação Tecnológica. 2012.

HONGDILOKKUL, P.; KEERATIPINIT, K.; CHAWTHAI, S.; HARARAK, B.; SEADAN, M.; SUTTIRUENGWONG, S. **A study on properties of PLA/PBAT from blown film process**. Materials Science and Environmental, v. 87, 2015.

ICHIKAWA, Y.; MIZUKOSHI, T. **Bionolle (Polybutylenesuccinate)**. In: Advances in Polymer Science, 2012.

IPCC - INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. Egglestone S, Buendia L, Miwa K, Ngara T. K; 2006. **IPCC Guidelines for National Greenhouse Inventories**. Vol. 4, Agriculture, Forestry and Other Land Use, Tanabe (eds.), IGES, Japan.

JABBOUR, C.J.C. **Tecnologias ambientais: em busca de um significado**. Revista de Administração Pública, v. 44, n. 3, p. 59-611, 2010.

JACOBI, P. **Meio Ambiente e Sustentabilidade**. In: CEPAN, F. P. F. L.O Município do século XXI. São Paulo: CEPAN, 1999. p. 175184.

JACQUEMIN, L.; PONTALIER, P.; SABLAYROLLES,C. **Life Cycle Assessment (LCA) applied to the process industry: a review**. International Journal of Life Cycle Assessment, v.17, n.8, p.1028-1041, 2012.

JIANG, L.; WOLCOTT, M.; ZHANG, J. **Study of Biodegradable Polylactide/ Poly (butylene adipate-co-terephthalate) Blends**. Biomacromolecules, v. 7, n. 1, p. 199-207, 2006.

JUNIOR, J. A.; MAGALHÃES, D.; OLIVEIRA, N. A.; WIEBECK, H.; MATOS, J.R. **Thermal Degradation and Kinetic Parameters of Polyester and Poly(Lactic Acid) Blends Used in Shopping Bags in Brazil**. Journal of polymer and the environmental, v. 22, n. 1, p. 52-57, 2014.

- JURAS, I.A.G.M. **Plásticos Biodegradáveis 2013**. Disponível em: <[http://bd.camara.gov.br/bd/bitstream/handle/bdcamara/14416/plasticos\\_biodegradaveis\\_juras.pdf?sequence=4](http://bd.camara.gov.br/bd/bitstream/handle/bdcamara/14416/plasticos_biodegradaveis_juras.pdf?sequence=4)>. Acesso em: 16 de dezembro de 2016.
- KHOO, H.H.; TAN, R.B.H.; CHNG, K.W.L. **Environmental impacts of conventional plastic and bio-based carrier bags**. International Journal of Life Cycle Assessment, v. 15, n. 3, p. 284-293, 2010.
- KÖLLNER, T.; SCHOLZ, R. **Assessment of Land Use Impacts on the Natural Environment**, Part 1: An Analytical Framework for Pure Land Occupation and Land Use Change. International Journal of Life Cycle Assessment, v. 12, p. 16-23, 2007 . Part 2: Generic Characterization Factors for Local Species Diversity in Central Europe. International Journal of Life Cycle Assessment, v. 13, p. 32-48, 2007.
- KRISHNAIAH, P.; RATNAM, C.T.; MANICKAM, S. **Development of silane grafted halloysite nanotube reinforced polylactide nanocomposites for the enhancement of mechanical, thermal and dynamic-mechanical properties**. Applied Clay Science, v. 135, p. 583-595, 2017.
- KUCHNIER, C.N. **Estudo do Efeito de Aditivo Extensor de Cadeia Multifuncional em Blendas de PLA/PBAT**. 2014. 154f. Dissertação de Mestrado em Engenharia Química – Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP), Campinas, 2014.
- KÜNKEL, A.; BECKER, J.; BÖRGER, L.; HAMPRECHT, J.; KOLTZENBURG, S.; LOOS, R.; SCHICK, M.B.; SCHLEGEL, K.; SINKEL, C.; SKUPIN, G.; YAMAMOTO, M. **Polymers, Biodegradable**. In: Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry, Editora Wiley-VCH Verlag GmbH & Co, 2016.
- LAVAGNOLO, M.C.. **A Glance at the World**. Waste Management, v.30, n. 7, p. 1430-1432, 2010.

LEJA, K.; LEWANDOWICZ, G. **Polymer Biodegradation and Biodegradable Polymers – a Review**. Polish Journal of Environmental Studies, v. 19, n. 2, p. 255-266, 2010.

LINO, F.A.M.; ISMAIL, K. **Energy and Environmental potential of solid waste in Brazil**. Energy Policy, v. 39, n. 6, p. 3496-3502, 2011.

MACHADO, M.L.C. **Estudo das propriedades mecânicas e térmicas do polímero biodegradável poli-3-hidroxitirato (PHB) e de compósitos PHB/Pó de madeira**. 2008. 134f. Tese (Doutorado em Biotecnologia). Universidade de São Paulo, 2008

MALI, S.; GROSSMANN, M.V.E.; YAMASHITA, F. **Filmes de amido: produção, propriedades e potencial de utilização**. Semina: Ciências Agrárias, Londrina, v. 31, n. 1, p. 137-156, 2010.

MATILLA, T.; KUJANPAA, M.; DAHLBO, H.; SOUKKA, R.; MYLLYMAA, T. **Uncertainty and Sensitivity in the Carbon Footprint of Shopping Bags**. Journal of Industrial Ecology, v.15, n.2, p. 217-227, 2011.

MAZUR, F. **Avaliação do Ciclo de Vida do produto: Uma ferramenta de Gestão Ambiental**. 2011. 36f. Monografia (Especialização em Gestão Industrial). Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Brasil, 2011.

MIGUEL, J.J.P. **Estudo Comparativo das Propriedades Térmicas e Mecânicas do Polipropileno Reforçado com Óxido de Zinco, Carbonato de Cálcio e Talco**. 2010. 83f. Dissertação de mestrado em Gestão e Tecnologia Ambiental. Faculdade de Tecnologia SENAI CIMATEC, Salvador, 2010.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE (MMA). **Plano de ação para produção e consumo sustentáveis - PPCS: Relatório do primeiro ciclo de implementação**. Brasília: MMA, 2014. 164 p.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE (MMA). **Saco é um Saco**. Disponível em: <<http://www.sacoeumsaco.gov.br/>>. Acesso em 12 dezembro. 2015.

MOHEE, R.; UNMAR, G.D. **Determining Biodegradability of Plastic Materials Under Controlled and Natural Composting Environments.** Waste Management, v. 2007, n. 11, p. 1486-1493, 2007.

MOHEE, R.; UNMAR, G.D.; MUDHOO, A.; KHADDOO, P. **Biodegradability of biodegradable/degradable plastic materials under aerobic and anaerobic conditions.** Waste Management, England: Pergamon-Elsevier Science, v. 28, n. 9, p. 1624-1629, 2008.

MONTAGNA, L.S. **Desenvolvimento de Polipropileno Ambientalmente Degradável.** 2014. 184f. Dissertação (Doutorado em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Brasil, 2014.

MORAES, A.C.; OLIVEIRA, B.; VIEIRA, D.P.; SILVA, D.K.; DOHLER, L.; SANTOS, V.F. **Estudo Comparativo entre a Degradação do Poli (L-Ácido Lático) (PLLA) e do Polietileno De Alta Densidade (PEAD) em Solo Compostado.** Revista de Extensão e Iniciação Científica SOCIESC, v. 1, n.2, 2014.

MORAES, M.F.V. **Produção e Caracterização da Blenda Polimérica Biodegradável Poli (hidroxibutirato) (PHB)/ Copoliéster Alifático Aromático (Ecoflex®) para Aplicação em Embalagens.** 2004. 115f. Dissertação de Mestrado (Engenharia de Materiais) – Universidade Federal de Ouro Preto, 2004.

MORITA, R.Y., RICHART, F.S., BARBOSA, R.V., MUNARO, M.; KLOSS, J.R. **Influence of Organophilic Ammonium-Free Nanoclay Incorporation on Mechanical Properties and Biodegradability of Biodegradable Polyester.** Macromolecular Symposia. v. 319, n. 1, p. 108-113, 2012.

MUSLEH, A.; SILVA, C.R.; OLIVEIRA, S.A. **Análise de Ecoeficiência para Geração de Energia Elétrica.** 2013. 79 f. Monografia (Graduação em Engenharia Ambiental) – Faculdades Oswaldo Cruz, São Paulo, 2013.

MUTHU, S. S.; LI, Yi; HU, J.Y.; MOK, P. Y. DING, X. **Eco-impact of Plastic and Paper Shopping Bags**. Journal of Engineered Fibers and Fabrics. v. 7, n. 1, p. 26-37, 2012.

NEVILLE, A.M.; BROOKS, J.J. **Tecnologia do concreto**. 2ª edição. Editora Bookman, 472 p. 2013.

NOVACK, K.M.; FINZI-QUINTÃO, C.M. **Identificação Da Composição De Amostras De Sacolas Plásticas Biodegradáveis e Oxobiodegradáveis Através De Análises Térmicas Em Atmosfera Inerte E Oxidante**. Congresso Brasileiro de Polímeros, 2015.

NSF - **BASF's Eco-Efficiency Analysis Methodology**. 2013. Disponível em: <<http://www.nsf.org/newsroom/basfs-eco-efficiency-analysis-methodology-may-2013>>. Acesso em: 20 junho 2016.

OKHRIMENKO, D.V.; DALBY, K.N.; SKOVBJERG, L.L.; BOVET, N.; CHRISTENSEN, J.H.; STIPP, S.L.S. **The surface reactivity of chalk (biogenic calcite) with hydrophilic and hydrophobic functional groups**. Geochimica et Cosmochimica Acta, v. 128, p. 212-224, 2014.

OLIVATO, J.B.; GROSSMANN, M.V.E; BILCK, A.P.; YAMASHITA, F.; OLIVEIRA, L.M. **Starch/ Polymers Films: Simultaneous Optimisation of the Properties for the Production of Biodegradable Plastic Bags**. Polímeros Ciência e Tecnologia, v. 23, n. 1, p. 32-36, 2013.

OLIVEIRA, M.C.B.R. **Gestão De Resíduos Plásticos Pós-Consumo: Perspectivas Para A Reciclagem No Brasil**. 2012. Dissertação (Mestrado em Planejamento Energético), Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2012.

OLIVEIRA, F.V.; MARTINS, A.H. **Precipitação de carbonato de cálcio para aplicação industrial**. Rem: Revista Escola de Minas, v. 62, n. 2, p. 175-183, 2009.

PALSIKOWSKI, P. Estudo do **Comportamento da Biodegradação em Solo de Blendas Compatibilizadas De PLA/PBAT e seus Efeitos Genotóxicos e Mutagênicos**. 2015. 154f. Dissertação de Mestrado. UNICAMP, Brasil, 2015.

PARENTE, R.A. **Elementos Estruturais de Plástico Reciclado**. 2006. 153 f. Dissertação de Mestrado em Engenharia de Estruturas. São Carlos, Brasil, 2006.

PARRON, L.M.; MUNIZ, D.H.F.; PEREIRA, C.M. **Manual de procedimentos de amostragem e análise físico-química de água**. EMBRAPA FLORESTAS, 2011. Disponível em: < <https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/921050/manual-de-procedimentos-de-amostragem-e-analise-fisico-quimica-de-agua>.

PASSATORE, C.R. **Compósitos De Polipropileno Com Reforço De Fibras Vegetais Tipo Cambará, Coco, Sisal E Piaçava**. 2014. 133f. Dissertação (Mestrado em Nanociências e Materiais Avançados), Universidade Federal do ABC, 2014.

PEDROSA, D.S.F.; NISHIWAKI, A.A.M. **Resíduos Sólidos: Uma visão prospectiva a partir da análise histórica da gestão**. In: Resíduos sólidos Perspectivas e desafios para a gestão integrada, 2014.

PELLICANO, M. **Desenvolvimento e Caracterização de Blendas PHBV/ ECOFLEX® e suas Modificações com Amido**. 2008. 156f. Dissertação de Mestrado em Engenharia de Materiais. Universidade Federal de São Carlos. São Carlos, Brasil, 2008.

PELLICANO, M.; PACHEKOSKI, W.; AGNELLI, J.A.M. **Influência da Adição de Amido de Mandioca na Biodegradação da Blenda Polimérica PHBV/ Ecoflex®**. Polímeros, v. 19, n.3, p. 212, 2009.

PFISTER S., KOEHLER A., HELLWEG, S. **Assessing the Environmental Impacts of Freshwater Consumption in LCA**, Environmental Science & Technology, 2009.

PLASTIVIDA. **Opinião da população sobre o uso de sacolas plásticas.** Disponível em: [http://www.plastivida.org.br/2009/pdfs/posicionamentoestudos/Pesquisa\\_Datafolha\\_agosto\\_2012.pdf](http://www.plastivida.org.br/2009/pdfs/posicionamentoestudos/Pesquisa_Datafolha_agosto_2012.pdf)>. Acesso em: 08 mai. 2015.

QUEIROZ, G.C.; GARCIA, E.E.C. **Reciclagem de Sacolas Plásticas de Polietileno em Termos de Inventário de Ciclo de Vida.** *Polímeros*, v. 20, n. 5, 2011.

REDDY, M.M.; VIVEKANANDHAN, S.; MISRA, M.; MOHANTY, A.K. **Biobased Plastics and Bionanocomposites: Current Status and Future Opportunities.** *Progress in Polymer Science*, v. 38, p. 1653-1689, 2013.

REN, J.; FU, H.; REN, T.; YUAN, W. **Preparation, characterization and properties of binary and ternary blends with thermoplastic starch, poly(lactic acid) and poly(butylene adipate-co-terephthalate).** *Carbohydrate Polymers*, v. 77, p. 576-582, 2009.

REZENDE, M.L. **Avaliação da influência da pró-oxidação nas propriedades de PCL, PEBD e suas blendas sob envelhecimento térmico.** 2007. 147p. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação Stricto Sensu em Engenharia e Ciência dos Materiais, Universidade São Francisco, Itatiba, 2007.

RIEGER, B.; KUNKEL, A.; COATES, G.W.; REICHARDT, R.; DINJUS, E.; ZEVACO, T.A. **Synthetic Biodegradable Polymers.** In: *Advances in Polymer Science*, 2010.

ROMÃO, W.; SPINACÉ, M.A.S.; DE PAOLI, M.A. **Poly(ethylene terephthalate), PET: a review on the synthesis processes, degradation mechanisms and its recycling.** *Polímeros*, v. 19, n. 2, São Carlos Apr./June, 2009.

ROSA, D.S.; CARVALHO, J.S.; DIAS, E.H.O.; PERES, M.R.; OLIVEIRA, S.A. **A degradação de resíduos plásticos e o tratamento de lodos de esgoto.** In: *Ciência e Tecnologia Ambiental: Conceitos e Perspectivas*. 1ed. São Bernardo do Campo: Editora UFABC, 2016.

ROSA, D.S.; PANTANO FILHO, R. **Biodegradação: um ensaio com polímeros**. Bragança Paulista: Mara, 2003.

RUTKOWSKI, J.E.; RUTKOWSKI, E.W. **Expanding worldwide urban solid waste recycling: The Brazilian social technology in waste pickers inclusion**. Waste Management & Research, v. 32, n. 12, p. 1084-1093, 2015.

SALING, P.; KICHERER, A.; KRÄMER, B.D.; WITTLINGER, R.; ZOMBIK, W.; SCHMIDT, I.; SCHROTT, W.; SCHMIDT, S. **Ecoefficiency Analysis by BASF: The Method**. The International Journal of Life Cycle Assessment, v. 7, n. 4, 2002.

SANCHÉZ, L.F. **Avaliação de impacto ambiental: conceitos e métodos**. 2ed. São Paulo: Oficina de textos, 2013.

SANTOS, A.S.F.; AGNELLI, J.A.M.; MANRICH, S. **Tendências e Desafios da Reciclagem de Embalagens Plásticas, Polímeros**, São Carlos, v. 14, n. 5, p. 307-312, dez/2004.

SANTOS, A.S.F.; FREIRE, F.H.O.; COSTA, B.L.N.; MANRICH, S. **Sacolas plásticas: destinações sustentáveis e alternativas de substituição**. Polímeros, v. 22, n. 3, 2012.

SANTOS, T.R.; DUARTE, A.C. **A critical Overview of the Analytical Approaches to the Occurrence, the Fate and the Behaviour of Microplastics in the Environment**. Trends in Analytical Chemistry, v.65, p. 47-53, 2015.

SCOTON, E.J.; BATTISTELLE, R.A.G.; BEZERRA, B.S.; AKUTSU, J. **A sewage sludge co-composting process using respirometric monitoring method in hermetic rotary reactor**. Journal of Cleaner Production, v. 121, p. 169-175, 2016.

SHAH, A.A.; HASA, F.; HAMEED, A.; AHMED, S. **Biological degradation of plastics: A comprehensive review**, Biotechnology Advances, England: Pergamon-Elsevier Science LTD, v. 26, n. 3, p. 246-265, 2008.

SHI, N.; DOU, Q. **Crystallization behavior, Morphology and Mechanical Properties of Poly (lactic acid)/ Tributyl Citrate/ Treated Calcium Carbonate Composites**. Polymer Composites, v. 35, n. 8, p. 1570-1582, 2014.

SIEGENTHALER, K.O.; KUNKEL, A.; SKUPIN, G.; YAMAMOTO, M. **Ecoflex® and Ecovio®: Biodegradable, Performance-Enabling Plastics**. In: Advances in Polymer Science, 2012.

SIQUEIRA, T.M.O.; ASSAD, M.L.R.C.L. **Compostagem De Resíduos Sólidos Urbanos No Estado De São Paulo (Brasil)**. Ambiente e Sociedade, v. XVIII, n. 4, p. 243-264, 2015.

SILVA, A.L.N.; BERTOLINO, L.C.; NASSER, R.O.; COSTA, L.S.; MELO, A.A.; MARQUEZINE, L.P.S.; SILVA, A.H.M.F.T.; ALVES, V.O.; NASCIMENTO, C.R.V. **Aplicação de um planejamento fatorial para a avaliação das propriedades mecânicas, térmicas, morfológicas e de escoamento de compósitos à base de PEAD e CaCO<sub>3</sub>**. Matéria (Rio de Janeiro), v. 18, n. 3, p. 1382-1394, 2013.

SILVA, T.N.; FREITAS, F.S.N.; CANDIANI, G. **Avaliação das emissões superficiais do gás de aterros sanitários de grande porte**. Engenharia Sanitária Ambiental, v. 18, n. 2, p. 95-104, 2013.

SILVA, G.A.; OLIVEIRA, S.A. **Glossário de Avaliação de Ciclo de Vida**. Disponível em: <<http://www.espacoeco.org.br/media/55031/Gloss%C3%A1rio-de-Avalia%C3%A7%C3%A3o-de-Ciclo-de-Vida-05-11-14.pdf>>. Acesso em: 15 abril. 2016.

SILVA, M.C.; OLIVEIRA, S.V.; ARAÚJO, E.M. **Propriedades mecânicas e térmicas de sistemas de PLA e PBAT/PLA**. Revista Eletrônica de Materiais e Processos, v. 9, n. 2, p. 112-117, 2014.

SILVA, V.A.; TIIMOB, B.; RANGARI, V.K.; SILVA, R.N.A.; NETO, J.C.M.; MOURA, E. A.B. **Preparação e Caracterização de Compósitos Baseados na Blenda de**

**Pbat/Amido, Micro e Nanocargas de Bio-Caco<sub>3</sub>**. Congresso Brasileiro de Polímeros, 2015.

SIRACUSA, V.; ROCCULI, P.; ROMANI, S.; ROSA, M. D. **Biodegradable polymers for food packaging: a review**. Trends in Food Science and Technology, v. 19, n. 12, p. 634-643, 2008.

SPINACÉ, M.A.S.; DE PAOLI, M.A.. **A tecnologia da reciclagem de polímeros**. v. 28, n. 1, 2005.

TEAMSINSUNGVON, A.; RUKSAKULPIWA, Y.; JARUKUMJORN, K. **Preparation and Characterization of Poly(lactic acid)/ Poly(butylene adipate-co-terephthalate) Blends and Their Composite**. Polymer-Plastics Technology and Engineering, v. 53, p. 1362-1367, 2013.

TEAMSINSUNGVON, A.; RUKSAKULPIWA, Y.; JARUKUMJORN, K. **Properties of Biodegradable Poly (lactic acid)/Poly (butylene adipate-coterephthalate)/Calcium Carbonate Composites**. Advanced Materials Research, v. 123-125, p. 193-196, 2010.

TOUGH, R. **Plastic Shopping Bags: Environmental Impacts and Policy Options**. 2007. 212 f. Tese de doutorado em Estudos Ambientais - Victoria University of Wellington, New Zealand, 2007.

UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME (UNEP). **Global Guidance Principles for Life Cycle Assessment Databases – A Basis for Greener Processes and Products** – Shonan Guidance Principles. Paris: UNEP, 2011.

USGS - **U.S. Geological Survey**. Disponível em: < <http://www.usgs.gov/>>. Acesso em: 23 junho. 2014.

VACCIOLI, K. **Estudo da blenda PBAT/PLA com cargas**. 2015. 128f. Dissertação (Mestrado em Ciências), Universidade de São Paulo, 2015.

VENKATESAN, R.; RAJESWARI, N. **ZnO/PBAT nanocomposite films: Investigation on the mechanical and biological activity for food packaging.** *Polymers for Advanced Technologies*, v. 28, p. 20-27, 2017.

VERORDNUNG ÜBER ANFORDERUNGEN AN DAS EINLEITEN VON ABWASSER IN GEWÄSSER (ABWASSERVERORDNUNG - ABWV). **Anhang 22 Chemische Industrie.** Disponível em: < [https://www.gesetze-im-internet.de/abwv/anhang\\_22.html](https://www.gesetze-im-internet.de/abwv/anhang_22.html).>

VIANA, M.B. **Sacolas Plásticas: Aspectos controversos de seu uso e Iniciativas Legislativas.** Disponível em: < [http://www2.camara.leg.br/documentos-e-pesquisa/publicacoes/estnottec/areas-da-conle/tema14/2009\\_11646.pdf](http://www2.camara.leg.br/documentos-e-pesquisa/publicacoes/estnottec/areas-da-conle/tema14/2009_11646.pdf)>. Acesso em 23 novembro 2015.

VIANNA, F.C. **Análise De Ecoeficiência: Avaliação do Desempenho Econômico-Ambiental do Biodiesel e Petrodiesel.** 2006. 205p. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação Stricto Sensu em Engenharia, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.

VIEIRA, M.M.G. **Desenvolvimento de Compostos Poliméricos Biodegradáveis Modificados com Cargas e Fibras Naturais Vegetais.** 2010. 198f. Dissertação Mestrado em Ciência e Engenharia dos Materiais, Universidade Federal de São Carlos, 2010.

VIEIRA, R.D.S.; CANAVEIRA, P.; DA SIMÕES, A.; DOMINGOS, T. **Industrial hemp or eucalyptus paper?** *The International Journal of Life Cycle Assessment*, v. 15, n. 4, p. 368-375, 2010.

VRSALJKO, D.; MACUT, D.; KOVACEVIC, V. **Potential Role of Nanofillers as Compatibilizers in Immiscible PLA/LDPE Blends.** *Journal of Applied Polymer Science*, v. 132, n. 6, online, 2015.

WENG, Y.; JIN, Y., MENG, Q.; WANG, L.; ZHANG, M.; WANG, Y. **Biodegradation behavior of poly(butylene adipate-coterephthalate) (PBAT), poly(lactic acid)**

**(PLA), and their blend under soil conditions.** *Polymer Testing*, v. 32, p. 918-926, 2013.

WILES, D.M. **Oxo-biodegradable polyolefins.** In: SMITH, R. (Ed.) *Biodegradable polymers for industrial applications*. 1. Ed. Cambridge: Woodhead Publishing Ltd., 2005, p. 437-450.

WILLERS, C.D; RODRIGUES, L.B.; SILVA, C.A. **Avaliação do ciclo de vida no Brasil: uma investigação nas principais bases científicas nacionais.** *Production*, v. 23, n.2, p. 436-447, 2013.

WOJTCZAK, M.; DUTKIEWICZ, S.; GALESKI, A.; PIORKOWSKA, E. **Structure and characterization of random aliphatic-aromatic copolyester.** *European Polymer Journal*. v. 55, n. 1, p. 86-97, 2014.

WORLD BUSINESS COUNCIL FOR SUSTAINABLE DEVELOPMENT [WBCSD]. **Eco-Efficiency: creating more value with less impact.** Geneva: WBCSD, 2000.

WORLD COMMISSION ON ENVIRONMENT AND DEVELOPMENT [WCED]. *Report of the World Commission on Environment and Development: Our Common Future: WCED*, 1987. p. 300.

YEH, J.; TSOU, C.; HUANG, C.; CHEN, K.; WU, C.; CHAI, W. **Compatible and Crystallization Properties of Poly(lactic acid)/ Poly(butylene adipate-co-terephthalate) Blends.** *Journal of Applied Polymer Science*. v. 116, p. 680–687, 2009.

YU, L.; DEAN, K.; LI, L. **Polymer Blends and Composites from Renewable Resources**, v. 31, n. 6, p. 576-602, 2009.

YUAN, Y.; LEE, T.R. **Contact Angle and Wetting Properties.** In: *Surface Science Techniques*, Editora Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2013.

ZHANG, N.; ZENG, C.; WANG, L.; REN, J. **Preparation and Properties of Biodegradable Poly(lactic acid)/ Poly(butylene adipate-co-terephthalate) Blend with EpoxyFunctional Styrene Acrylic Copolymer as Reactive Agent.** *Journal of Polymers and the Environment*, v. 21, n.1, p. 286-292, 2013.

## ANEXOS

ANEXO A – Inventário *Kraft Paper Unbleached*

Tabela 44: Demanda Acumulada de Energia para a produção de 1kg de bobina de papel kraft

Consumo de Energia	Valor	Unidade
Carvão	4,051	MJ
Petróleo	7,136	MJ
Gás Natural	18,997	MJ
Nuclear	7,761	MJ
Lignita	3,214	MJ
Renováveis	21,900	MJ
Não renováveis	5,059	MJ
Outras	0,116	MJ
<b>Total de Consumo de Energia</b>	<b>68,24</b>	<b>MJ</b>

Tabela 45: Consumo de Água para a produção de 1kg de bobina de papel kraft

Consumo de Água	Valor	Unidade
Água de consumo	<b>0,270</b>	<b>litros</b>

Tabela 46: Resíduos Sólidos decorrentes da produção de 1 kg de bobina de papel kraft

Resíduos Sólidos	Valor	Unidade
Resíduo Municipal	0,089	kg
Resíduo Industrial	0,011	kg
Resíduo Radioativo	$2,05 \times 10^{-08}$	kg
Resíduo da Construção	$6,73 \times 10^{-04}$	kg
Resíduo de Mineração	0,091	kg

**Tabela 47: Consumo de Recursos Abióticos para a produção de 1kg de bobina de papel kraft**

<b>Consumo de Recursos</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidade</b>
Carvão	0,147	kg
Petróleo	0,166	kg
Gás Natural	0,403	kg
Lignita	0,309	kg
Urânio	$1,55 \times 10^{-05}$	kg
NaCl	0,042	kg
Enxofre	0,004	kg
Fósforo	$2,03 \times 10^{-04}$	kg
Ferro	0,001	kg
Calcário	0,047	kg
Bauxita	$3,75 \times 10^{-05}$	kg
Cobre	$8,80 \times 10^{-06}$	kg
Titânio	$2,64 \times 10^{-06}$	kg
Manganês	$4,55 \times 10^{-07}$	kg
Zinco	$3,49 \times 10^{-07}$	kg
<b>Prata</b>	<b>8,46E-11</b>	<b>kg</b>

**Tabela 48: Emissões Atmosféricas decorrentes da produção de 1 kg de bobina de papel kraft**

<b>Emissões Atmosféricas</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidade</b>
CO <sub>2</sub>	2.080.783	mg CO <sub>2</sub> eq.
SO <sub>x</sub>	11.057	mg
NO <sub>x</sub>	11.951	Mg
CH <sub>4</sub>	14.917	Mg
NM-COVs	814,114	mg C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> eq.
HC Halogenados	0,107	mg CFC11 eq.
NH <sub>3</sub>	1,496	mg
N <sub>2</sub> O	28,154	mg
HCl	104,995	mg

Tabela 49: Efluentes decorrentes da produção de 1 kg de bobina de papel kraft

<b>Efluentes</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidade</b>
DQO	20.872	mg
N-total	2,726	mg N
PO <sub>4</sub>	38,995	mg P
AOX	9,128	mg
Sulfato	464,350	mg
Cloreto	664,420	mg
Mercúrio	0,885	mg
Cádmio	0,003	mg
Crômio	0,027	mg
Zinco	0,096	mg
Cobre	0,037	mg
Níquel	0,034	mg
Chumbo	0,017	mg
Estanho	0,001	mg

Tabela 50: Doenças e Acidentes Ocupacionais decorrentes da produção de 1 kg de bobina de papel kraft

<b>Doenças e Acidentes ocupacionais</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidade</b>
Acidentes de trabalho	$6,28 \times 10^{-07}$	número
Acidentes fatais	$1,29 \times 10^{-09}$	número
Doenças ocupacionais	$1,52 \times 10^{-08}$	número

Tabela 51: Potencial de Toxicidade decorrente da produção de 1 kg de bobina de papel kraft

<b>Potencial de Toxicidade Humana</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidade</b>
	448,609	pontos

**Tabela 52: Uso da Terra para a produção de 1kg de bobina de papel kraft, totalizando uma ocupação de 0,06 m<sup>2</sup> de área por kg produzido**

<b>Uso da Terra</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidade</b>
Área urbana	1,49 x 10 <sup>-06</sup>	m <sup>2</sup>
Área industrial	0,002	m <sup>2</sup>
Área de tráfego	3,09 x 10 <sup>-05</sup>	m <sup>2</sup>
Local de extração mineral	9,96 x 10 <sup>-05</sup>	m <sup>2</sup>
Local de despejo	9,53 x 10 <sup>-05</sup>	m <sup>2</sup>
Terra arável	0,060	m <sup>2</sup>
Terra arável, intensiva	0	m <sup>2</sup>
Terra arável, não irrigada	5,99 x 10 <sup>-07</sup>	m <sup>2</sup>
Terra de cultura permanente	8,49 x 10 <sup>-08</sup>	m <sup>2</sup>
Terra de prados e pastagens	0	m <sup>2</sup>
Floresta	0,001	m <sup>2</sup>
Matagal	2,24 x 10 <sup>-07</sup>	m <sup>2</sup>
Áreas úmidas	1,26 x 10 <sup>-04</sup>	m <sup>2</sup>

### **ANEXO B – Inventário *polyethylene at production***

**Tabela 53: Demanda Acumulada de Energia para a produção de 1kg de PEAD**

<b>Consumo de Energia</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidade</b>
Carvão	0,309	MJ
Petróleo	34,176	MJ
Gás Natural	28,319	MJ
Nuclear	0,176	MJ
Lignita	0,014	MJ
Renováveis	1,550	MJ
Não renováveis	2,768	MJ
Outras	0,014	MJ
<b>Total de Consumo de Energia</b>	<b>67,299</b>	<b>MJ</b>

**Tabela 54: Consumo de Recursos Abióticos para a produção de 1kg de PEAD**

<b>Consumo de Recursos</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidade</b>
Carvão	0,011	kg
Petróleo	0,795	kg
Gás Natural	0,601	kg
Lignita	0,001	kg
Urânio	$3,51 \times 10^{-07}$	kg
NaCl	0,002	kg
Enxofre	$2,83 \times 10^{-05}$	kg
Fósforo	$1,97 \times 10^{-07}$	kg
Ferro	$1,05 \times 10^{-04}$	kg
Calcário	$9,11 \times 10^{-05}$	kg
Bauxita	$2,26 \times 10^{-04}$	kg
Cobre	$2,05 \times 10^{-11}$	kg
Titânio	$1,78 \times 10^{-12}$	kg
Manganês	$8,25 \times 10^{-12}$	kg
Zinco	$5,97 \times 10^{-09}$	kg
<b>Prata</b>	$3,01 \times 10^{-16}$	<b>kg</b>

**Tabela 55: Consumo de Água para a produção de 1kg de PEAD**

<b>Consumo de Água</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidade</b>
Água de consumo	0,009	litros

**Tabela 56: Doenças e Acidentes Ocupacionais decorrentes da produção de 1 kg de polietileno de alta densidade**

<b>Doenças e Acidentes ocupacionais</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidade</b>
Acidentes de trabalho	$1,65 \times 10^{-07}$	número
Acidentes fatais	$1,02 \times 10^{-10}$	número
Doenças ocupacionais	$1,57 \times 10^{-08}$	número

**Tabela 57: Resíduos Sólidos decorrentes da produção de 1 kg de polietileno de alta densidade**

<b>Resíduos Sólidos</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidade</b>
Resíduo Municipal	0,050	kg
Resíduo Industrial	0,013	kg
Resíduo Radioativo	$4,92 \times 10^{-10}$	kg
Resíduo da Construção	$2,56 \times 10^{-08}$	kg
Resíduo de Mineração	$3,11 \times 10^{-03}$	kg

**Tabela 58: Emissões Atmosféricas decorrentes da produção de 1 kg de polietileno de alta densidade**

<b>Emissões Atmosféricas</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidade</b>
CO <sub>2</sub>	1.005.891	mg CO <sub>2</sub> eq
SO <sub>x</sub>	1.907	mg
NO <sub>x</sub>	3.399	mg
CH <sub>4</sub>	5.720	mg
NM-COVs	913,297	mg C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> -eq
HC Halogenados	0,207	mg CFC11 eq.
NH <sub>3</sub>	$1,01 \times 10^{-03}$	mg
N <sub>2</sub> O	$4,42 \times 10^{-04}$	mg
HCl	7,933	mg

**Tabela 59: Potencial de Toxicidade decorrente da produção de 1 kg de polietileno de alta densidade**

<b>Potencial de Toxicidade Humana</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidade</b>
	1.049	pontos

Tabela 60: Efluentes decorrentes da produção de 1 kg de polietileno de alta densidade

Efluentes	Valor	Unidade
DQO	12,115	mg
N-total	1,225	mg N
PO <sub>4</sub>	0,411	mg P
AOX	0,100	mg
Sulfato	228,262	mg
Cloreto	182,124	mg
Mercúrio	$2,77 \times 10^{-04}$	mg
Cádmio	$8,25 \times 10^{-06}$	mg
Crômio	$3,37 \times 10^{-07}$	mg
Zinco	0,052	mg
Cobre	$9,10 \times 10^{-04}$	mg
Níquel	$3,42 \times 10^{-04}$	mg
Chumbo	$2,50 \times 10^{-05}$	mg
Estanho	$3,35 \times 10^{-10}$	mg

Tabela 61: Uso da Terra para a produção de 1kg de PEAD, totalizando uma ocupação de 9,72E-04 m<sup>2</sup> de área

Uso da Terra	Valor	Unidade
Área urbana	$7,72 \times 10^{-12}$	m <sup>2</sup>
Área industrial	$9,72 \times 10^{-04}$	m <sup>2</sup>
Área de tráfego	$1,02 \times 10^{-10}$	m <sup>2</sup>
Local de extração mineral	$3,75 \times 10^{-09}$	m <sup>2</sup>
Local de despejo	$9,40 \times 10^{-11}$	m <sup>2</sup>
Terra arável	$1,00 \times 10^{-10}$	m <sup>2</sup>
Terra arável, intensiva	0	m <sup>2</sup>
Terra arável, não irrigada	$1,00 \times 10^{-10}$	m <sup>2</sup>
Terra de cultura permanente	$1,52 \times 10^{-12}$	m <sup>2</sup>
Terra de prados e pastagens	0	m <sup>2</sup>
Floresta	$2,21 \times 10^{-09}$	m <sup>2</sup>
Matagal	$1,22 \times 10^{-12}$	m <sup>2</sup>
Áreas úmidas	$1,31 \times 10^{-10}$	m <sup>2</sup>

### ANEXO C – Inventário *Limestone drying*

Tabela 62: Demanda Acumulada de Energia para a produção de 1kg de CaCO<sub>3</sub>

Consumo de Energia	Valor	Unidade
Carvão	0,017	MJ
Petróleo	0,739	MJ
Gás Natural	0,046	MJ
Nuclear	0,004	MJ
Lignita	0,001	MJ
Renováveis	0,028	MJ
Não renováveis	0,052	MJ
<b>Total de Consumo de Energia</b>	<b>0,89</b>	<b>MJ</b>

Tabela 63: Consumo de Recursos Abióticos para a produção de 1kg de CaCO<sub>3</sub>

Consumo de Recursos	Valor	Unidade
Carvão	0,001	kg
Petróleo	0,017	kg
Gás Natural	0,001	kg
Lignita	0,000118083	kg
Urânio	8,51 x 10 <sup>-09</sup>	kg
NaCl	9,11 x 10 <sup>-06</sup>	kg
Enxofre	5,14 x 10 <sup>-07</sup>	kg
Fósforo	3,39 x 10 <sup>-11</sup>	kg
Ferro	0,001	kg
Calcário	1,007	kg
Bauxita	3,03 x 10 <sup>-06</sup>	kg
Cobre	6,80 x 10 <sup>-10</sup>	kg
Titânio	3,85 x 10 <sup>-11</sup>	kg
Manganês	2,86 x 10 <sup>-10</sup>	kg
Zinco	2,07 x 10 <sup>-07</sup>	kg
<b>Prata</b>	<b>1,04E-14</b>	<b>kg</b>

**Tabela 64: Consumo de Água para a produção de 1kg de CaCO<sub>3</sub>**

<b>Consumo de Água</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidade</b>
Água de consumo	9,92 x 10 <sup>-04</sup>	litros

**Tabela 65: Emissões Atmosféricas decorrentes da produção de 1 kg de CaCO<sub>3</sub>**

<b>Emissões Atmosféricas</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidade</b>
CO <sub>2</sub>	57.834	mg CO <sub>2</sub> eq
SO <sub>x</sub>	416,686	mg
NO <sub>x</sub>	499,211	mg
CH <sub>4</sub>	164,714	mg
NM-COVs	63,037	mg C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> -eq
HC Halogenados	1,83 x 10 <sup>-05</sup>	mg CFC11 eq.
NH <sub>3</sub>	0,018	mg
N <sub>2</sub> O	0,001	mg
HCl	0,182	mg
Poeira	10.066	mg

**Tabela 66: Potencial de Toxicidade decorrente da produção de 1 kg de CaCO<sub>3</sub>**

<b>Potencial de Toxicidade Humana</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidade</b>
	39,276	pontos

**Tabela 67: Resíduos Sólidos decorrentes da produção de 1 kg de CaCO<sub>3</sub>**

<b>Resíduos Sólidos</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidade</b>
Resíduo Municipal	3,21 x 10 <sup>-04</sup>	kg
Resíduo Industrial	0,001	kg
Resíduo Radioativo	1,19 x 10 <sup>-11</sup>	kg
Resíduo da Construção	1,03 x 10 <sup>-07</sup>	kg
Resíduo de Mineração	0,090	kg

**Tabela 68: Doenças e Acidentes Ocupacionais decorrentes da produção de 1 kg de CaCO<sub>3</sub>**

<b>Doenças e Acidentes ocupacionais</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidade</b>
Acidentes de trabalho	$2,50 \times 10^{-07}$	número
Acidentes fatais	$2,68 \times 10^{-10}$	número
Doenças ocupacionais	$6,81 \times 10^{-09}$	número

**Tabela 69: Efluentes decorrentes da produção de 1 kg de CaCO<sub>3</sub>**

<b>Efluentes</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidade</b>
DQO	1,343	mg
N-total	0,027	mg N
PO <sub>4</sub>	$1,74 \times 10^{-04}$	mg P
AOX	$2,85 \times 10^{-06}$	mg
Sulfato	0,096	mg
Cloreto	0,232	mg
Mercúrio	$2,50 \times 10^{-06}$	mg
Cádmio	$1,37 \times 10^{-05}$	mg
Crômio	$6,36 \times 10^{-06}$	mg
Zinco	$1,88 \times 10^{-04}$	mg
Cobre	$2,13 \times 10^{-05}$	mg
Níquel	$1,16 \times 10^{-05}$	mg
Chumbo	0,001	mg
Estanho	$9,03 \times 10^{-09}$	mg

**Tabela 70: Uso da Terra para a produção de 1kg de CaCO<sub>3</sub>**

<b>Uso da Terra</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidade</b>
Área urbana	1,73 x 10 <sup>-10</sup>	m <sup>2</sup>
Área industrial	7,19 x 10 <sup>-4</sup>	m <sup>2</sup>
Área de tráfego	3,35 x 10 <sup>-09</sup>	m <sup>2</sup>
Local de extração mineral	1,34 x 10 <sup>-07</sup>	m <sup>2</sup>
Local de despejo	2,31 x 10 <sup>-09</sup>	m <sup>2</sup>
Terra arável	3,61 x 10 <sup>-09</sup>	m <sup>2</sup>
Terra arável, intensiva	0	m <sup>2</sup>
Terra arável, não irrigada	3,61 x 10 <sup>-09</sup>	m <sup>2</sup>
Terra de cultura permanente	3,02 x 10 <sup>-11</sup>	m <sup>2</sup>
Terra de prados e pastagens	0	m <sup>2</sup>
Floresta	7,26 x 10 <sup>-08</sup>	m <sup>2</sup>
Matagal	4,15 x 10 <sup>-11</sup>	m <sup>2</sup>
Áreas úmidas	3,76 x 10 <sup>-09</sup>	m <sup>2</sup>

**ANEXO D – Inventário *paper bag*****Tabela 71: Demanda Acumulada de Energia para a manufatura de 1kg de sacola de papel**

<b>Consumo de Energia</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidade</b>
Carvão	0,599	MJ
Petróleo	0,789	MJ
Gás Natural	0,197	MJ
Nuclear	0,635	MJ
Lignita	0,556	MJ
Renováveis	0,005	MJ
Não renováveis	0,049	MJ
<b>Total de Consumo de Energia</b>	<b>2,859</b>	<b>MJ</b>

**Tabela 72: Consumo de Água para a manufatura de 1kg de sacola de papel**

<b>Consumo de Água</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidade</b>
Água de consumo	2,81 x 10 <sup>-05</sup>	litros

**Tabela 73: Consumo de Recursos Abióticos para a manufatura de 1kg de sacola de papel**

<b>Consumo de Recursos</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidade</b>
Carvão	0,021	kg
Petróleo	0,018	kg
Gás Natural	0,004	kg
Lignita	0,053	kg
Urânio	$1,27 \times 10^{-06}$	kg
NaCl	$1,49 \times 10^{-07}$	kg
Enxofre	$6,91 \times 10^{-10}$	kg
Fósforo	$4,15 \times 10^{-12}$	kg
Ferro	$1,60 \times 10^{-05}$	kg
Calcário	$6,99 \times 10^{-06}$	kg
Bauxita	$3,02 \times 10^{-08}$	kg
Cobre	$1,91 \times 10^{-11}$	kg
Titânio	$1,08 \times 10^{-12}$	kg
Manganês	$8,06 \times 10^{-12}$	kg
Zinco	$5,84 \times 10^{-09}$	kg
<b>Prata</b>	$2,91 \times 10^{-16}$	<b>kg</b>

**Tabela 74: Emissões Atmosféricas decorrentes da manufatura de 1 kg de sacola de papel**

<b>Emissões Atmosféricas</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidade</b>
CO <sub>2</sub>	180.025	mg CO <sub>2</sub> eq
SO <sub>x</sub>	1.597	mg
NO <sub>x</sub>	536,276	mg
CH <sub>4</sub>	187,529	mg
NM-COVs	46,967	mg C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> -eq
HC Halogenados	$4,68 \times 10^{-05}$	mg CFC11 eq.
NH <sub>3</sub>	$5,12 \times 10^{-04}$	mg
N <sub>2</sub> O	$2,51 \times 10^{-05}$	mg
HCl	13,241	mg
Poeira	683,660	mg

**Tabela 75: Potencial de Toxicidade decorrente da manufatura de 1 kg de sacola de papel**

<b>Potencial de Toxicidade Humana</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidade</b>
	56,157	pontos

**Tabela 76: Doenças e Acidentes Ocupacionais decorrentes da manufatura de 1 kg de sacola de papel**

<b>Doenças e Acidentes ocupacionais</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidade</b>
Acidentes de trabalho	$5,62 \times 10^{-09}$	número
Acidentes fatais	$6,01 \times 10^{-12}$	número
Doenças ocupacionais	$1,33 \times 10^{-09}$	número

**Tabela 77: Resíduos Sólidos decorrentes da manufatura de 1 kg de sacola de papel**

<b>Resíduos Sólidos</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidade</b>
Resíduo Municipal	0,003	kg
Resíduo Industrial	$7,85 \times 10^{-05}$	kg
Resíduo Radioativo	$1,78 \times 10^{-09}$	kg
Resíduo da Construção	$4,03 \times 10^{-10}$	kg
Resíduo de Mineração	0,010	kg

**Tabela 78: Uso da Terra para a manufatura de 1kg de sacola de papel**

<b>Uso da Terra</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidade</b>
Área urbana	$4,89 \times 10^{-12}$	m <sup>2</sup>
Área industrial	$2,00 \times 10^{-04}$	m <sup>2</sup>
Área de tráfego	$9,42 \times 10^{-11}$	m <sup>2</sup>
Local de extração mineral	$3,78 \times 10^{-09}$	m <sup>2</sup>
Local de despejo	$6,51 \times 10^{-11}$	m <sup>2</sup>
Terra arável	$1,02 \times 10^{-10}$	m <sup>2</sup>
Terra arável, intensiva	0	m <sup>2</sup>
Terra arável, não irrigada	$1,02 \times 10^{-10}$	m <sup>2</sup>
Terra de cultura permanente	$8,51 \times 10^{-13}$	m <sup>2</sup>
Terra de prados e pastagens	0	m <sup>2</sup>
Floresta	$2,05 \times 10^{-09}$	m <sup>2</sup>
Matagal	$1,17 \times 10^{-12}$	m <sup>2</sup>
Áreas úmidas	$1,06 \times 10^{-10}$	m <sup>2</sup>

**Tabela 79: Efluentes decorrentes da manufatura de 1 kg de sacola de papel**

<b>Efluentes</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidade</b>
DQO	0,949	mg
N-total	0,093	mg N
PO <sub>4</sub>	$1,20 \times 10^{-04}$	mg P
AOX	$8,50 \times 10^{-08}$	mg
Sulfato	$1,16 \times 10^{-02}$	mg
Cloreto	$7,08 \times 10^{-02}$	mg
Mercúrio	$5,63 \times 10^{-08}$	mg
Cádmio	$3,86 \times 10^{-07}$	mg
Crômio	$1,78 \times 10^{-07}$	mg
Zinco	$5,10 \times 10^{-06}$	mg
Cobre	$1,81 \times 10^{-06}$	mg
Níquel	$2,35 \times 10^{-06}$	mg
Chumbo	$1,60 \times 10^{-05}$	mg
Estanho	$2,54 \times 10^{-10}$	mg

### ANEXO E – Inventário *plastic bag*

Tabela 80: Demanda Acumulada de Energia para a manufatura de uma sacola plástica

Consumo de Energia	Valor	Unidade
Carvão	0,001	MJ
Petróleo	0,015	MJ
Gás Natural	0,006	MJ
Nuclear	0,001	MJ
Lignita	0,001	MJ
Renováveis	$1,29 \times 10^{-05}$	MJ
Não renováveis	$8,22 \times 10^{-05}$	MJ
<b>Total de Consumo de Energia</b>	$7,02 \times 10^{-05}$	<b>MJ</b>

Tabela 81: Consumo de Recursos Abióticos para a manufatura de uma sacola plástica

Consumo de Recursos	Valor	Unidade
Carvão	$3,03 \times 10^{-05}$	kg
Petróleo	$3,53 \times 10^{-04}$	kg
Gás Natural	$1,35 \times 10^{-04}$	kg
Lignita	$7,07 \times 10^{-05}$	kg
Urânio	$1,74 \times 10^{-09}$	kg
NaCl	$2,27 \times 10^{-07}$	kg
Enxofre	$1,94 \times 10^{-09}$	kg
Fósforo	$3,34 \times 10^{-08}$	kg
Ferro	$1,15 \times 10^{-07}$	kg
Calcário	$3,36 \times 10^{-07}$	kg
Bauxita	$8,43 \times 10^{-08}$	kg
Cobre	$2,26 \times 10^{-13}$	kg
Titânio	$6,38 \times 10^{-14}$	kg
Manganês	$3,40 \times 10^{-14}$	kg
Zinco	$3,96 \times 10^{-11}$	kg
<b>Prata</b>	<b><math>2,39 \times 10^{-18}</math></b>	<b>kg</b>

Tabela 82: Consumo de Água para a manufatura de uma sacola plástica

Consumo de Água	Valor	Unidade
Água de consumo	$2,01 \times 10^{-06}$	litros

Tabela 83: Emissões Atmosféricas decorrentes para a manufatura de uma sacola plástica

Emissões Atmosféricas	Valor	Unidade
CO <sub>2</sub>	798,506	mg CO <sub>2</sub> eq
SO <sub>x</sub>	5,569	mg
NO <sub>x</sub>	4,556	mg
CH <sub>4</sub>	2,471	mg
NM-COVs	1,499	mg C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> -eq
HC Halogenados	$7,27 \times 10^{-06}$	mg CFC11 eq.
NH <sub>3</sub>	$2,45 \times 10^{-06}$	mg
N <sub>2</sub> O	$3,94 \times 10^{-07}$	mg
HCl	0,019	mg
Poeira	1,306	mg

Tabela 84: Potencial de Toxicidade decorrente para a manufatura de uma sacola plástica

Potencial de Toxicidade Humana	Valor	Unidade
	0,833	pontos

Tabela 85: Doenças e Acidentes Ocupacionais decorrente para a manufatura de uma sacola plástica

Doenças e Acidentes ocupacionais	Valor	Unidade
Acidentes de trabalho	$6,23 \times 10^{-11}$	número
Acidentes fatais	$4,69 \times 10^{-14}$	número
Doenças ocupacionais	$6,07 \times 10^{-12}$	número

Tabela 86: Resíduos Sólidos decorrente para a manufatura de uma sacola plástica

Resíduos Sólidos	Valor	Unidade
Resíduo Municipal	$4,28 \times 10^{-06}$	kg

Resíduo Industrial	$2,88 \times 10^{-06}$	kg
Resíduo Radioativo	$2,44 \times 10^{-12}$	kg
Resíduo da Construção	$3,11 \times 10^{-09}$	kg
Resíduo de Mineração	$1,45 \times 10^{-05}$	kg

**Tabela 87: Efluentes decorrentes para a manufatura de uma sacola plástica**

<b>Efluentes</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidade</b>
DQO	0,274	mg
N-total	0,002	mg N
PO <sub>4</sub>	$1,35 \times 10^{-04}$	mg P
AOX	$7,14 \times 10^{-05}$	mg
Sulfato	0,022	mg
Cloreto	0,053	mg
Mercúrio	$7,55 \times 10^{-08}$	mg
Cádmio	$1,31 \times 10^{-06}$	mg
Crômio	$2,31 \times 10^{-09}$	mg
Zinco	$1,78 \times 10^{-05}$	mg
Cobre	$2,24 \times 10^{-05}$	mg
Níquel	$9,51 \times 10^{-06}$	mg
Chumbo	$1,36 \times 10^{-06}$	mg
Estanho	$1,31 \times 10^{-11}$	mg

**Tabela 88: Uso da Terra para a manufatura da unidade da sacola PEAD**

<b>Uso da Terra</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidade</b>
Área urbana	$1,04 \times 10^{-13}$	m <sup>2</sup>
Área industrial	$1,71 \times 10^{-06}$	m <sup>2</sup>
Área de tráfego	$9,71 \times 10^{-13}$	m <sup>2</sup>
Local de extração mineral	$1,14 \times 10^{-11}$	m <sup>2</sup>
Local de despejo	$2,45 \times 10^{-12}$	m <sup>2</sup>
Terra arável	$2,65 \times 10^{-13}$	m <sup>2</sup>
Terra arável, intensiva	0	m <sup>2</sup>
Terra arável, não irrigada	$2,65 \times 10^{-13}$	m <sup>2</sup>
Terra de cultura permanente	$1,93 \times 10^{-14}$	m <sup>2</sup>
Terra de prados e pastagens	0	m <sup>2</sup>
Floresta	$3,08 \times 10^{-11}$	m <sup>2</sup>
Matagal	$8,19 \times 10^{-15}$	m <sup>2</sup>
Áreas úmidas	$2,98 \times 10^{-12}$	m <sup>2</sup>