

## *Relatório do Contratante para o Conselho Administrativo*

### **Avaliação do Desempenho de Embalagens Plásticas Ambientalmente Degradáveis e de Utensílios Plásticos Descartáveis para Alimentos – Relatório Final**

*Junho de 2007*

#### **Produzido sob contrato por:**

California State University (Universidade Estadual da Califórnia)  
Chico Research Foundation (Fundação de Pesquisas Chico)

zero waste  
(lixo zero)  
CALIFÓRNIA  
CONSELHO INTEGRADO DE GERENCIAMENTO DO LIXO

**ESTADO DA CALIFÓRNIA**

**Arnold Schwarzenegger**

Governador

**Linda S. Adams**

Secretária, Agência de Proteção Ambiental da Califórnia

**CONSELHO INTEGRADO DE GERENCIAMENTO DO LIXO**

**Margo Reid Brown**  
Presidente do Conselho

**Rosalie Mulé**  
Membro do Conselho

**Wesley Chesbro**  
Membro do Conselho

**Gary Petersen**  
Membro do Conselho

**Jeffrey Danzinger**  
Membro do Conselho

**Cheryl Peace**  
Membro do Conselho

**Mark Leary**  
Diretor Executivo

Para solicitar cópias adicionais desta publicação contate:

Integrated Waste Management Board

Public Affairs Office, Publications Clearinghouse (MS 6)

1001 I Street

P.O. Box 4025

Sacramento, CA 95812-4025

[www.ciwmb.ca.gov/Publications/](http://www.ciwmb.ca.gov/Publications/)

1-800-CA-WASTE (somente Califórnia only) ou (916) 341-6306

Publicação número 432-08-001

Cópias deste documento fornecidas originalmente por CIWMB foram impressas em papel reciclado contendo cem por cento de fibra pós-consumo.

Copyright © 2007 pelo Conselho Integrado de Gerenciamento do Lixo da Califórnia – California Waste Management Board. Todos os direitos reservados. Esta publicação, ou partes da mesma, não poderão ser reproduzidas sob qualquer forma sem permissão.

*Preparado como parte do contrato número IWM04072, \$250,000*

*O California Integrated Waste Management Board (CIWMB) não discrimina em caso de incapacidade de acesso aos seus programas. As publicações CIWMB estão disponíveis em formatos acessíveis mediante solicitação por telefone para a Repartição de Assuntos Públicos: (916) 341-6300. Pessoas com deficiência auditiva podem entrar em contato com a CIWMB pelo Serviço de Retransmissão da Califórnia: 1-800-735-2929.*

**Exoneração de Responsabilidade:** Este relatório para o Conselho foi produzido sob contrato pela California State University Chico Research Foundation. As afirmações e conclusões contidas neste relatório são as do contratante e não necessariamente do Conselho Integrado de Gerenciamento do Lixo da Califórnia, dos seus funcionários, ou do Estado da Califórnia, e não devem ser mencionadas ou citadas como política ou orientação oficial do Conselho.

O Estado não dá garantia, expressa ou implícita, e não assume responsabilidade pelas informações contidas no texto a seguir. Qualquer menção de produtos ou processos comerciais não deve ser interpretada como endosso de tais produtos ou processos.

## Conteúdo

Agradecimentos	2
Resumo Executivo	3
Introdução	5
Informações Prévias	6
Plásticos Convencionais	6
Plásticos Biodegradáveis	6
Plásticos Compostáveis	7
Produtos Plásticos Degradáveis	8
Avaliação do Ciclo de Vida de Plásticos Biodegradáveis e Convencionais	13
Padrões Atuais para Plásticos Biodegradáveis	15
Estados Unidos	15
Europa	16
ISO	16
Austrália	16
Japão	17
Custos do Plástico Biodegradável e Compostável	18
Estudo de Caso de Custos na CSU Chico	18
Degradação, Resíduos, Toxicidade e Segurança do Plástico Degradável	21
Plano de Ensaio de Biodegradação	24
Métodos de Ensaio	24
Materiais	25
Ensaio Laboratoriais	26
Procedimentos de Ensaio	26
Resultados da Concentração de Dióxido de Carbono	28
Resultados da Biodegradação	29
Ensaio de Fitotoxicidade	35
Ensaio de Metal Pesado	36
Ensaio Marinho	38
Background	38
Procedimento de Ensaio	38
Resultados	39
Digestão Anaeróbica	40
Materiais	40
Procedimentos de Ensaio	40
Resultados	41
Ambientes de Compostagem	44
Instalação de Composto Municipal, Cidade de Chico	44
Instalação de Composto <i>In-vessel</i> da Fazenda da Universidade	45
Instalação de Composto de Lixo Alimentar <i>In-vessel</i> em Vacaville	46

Instalação de Compostagem de MSW <i>In-vessel</i> no Município de Mariposa	46
Efeitos da Contaminação de Plásticos Degradáveis em Plásticos Reciclados	48
Procedimentos de Ensaio	48
Resultados	48
Conclusões e Recomendações	52
Anexos	53
Anexo A. Cálculos	53
Anexo B. Fotos de Amostras no Laboratório Experimental da CSU, Chico	55
Anexo C. Fotos de Amostras na Fazenda da CSU, Chico	59
Anexo D. Fotos de Amostras na Instalação de Compostagem Municipal da Cidade de Chico	60
Anexo E. Fotos de Amostras na Instalação de Composto <i>In-vessel</i> de Vacaville	62
Anexo F. Fotos de Amostras na Instalação de Composto <i>In-vessel</i> de Mariposa	63
Anexo G. Protocolo Experimental para Locais de Compostagem	64
Fontes das Notas de Referência	65

## Lista de Figuras

Figura 1. Disposição experimental do laboratório	27
Figura 2. Concentração ppm de CO <sub>2</sub> ppm de saco de lixo BioBag no 21º dia	28
Figura 3. Porcentagem de conversão de carbono somente para controle de composto	30
Figura 4. Porcentagem de conversão de carbono para controle de celulose	31
Figura 5. Porcentagem de conversão de carbono para controle de papel Kraft	31
Figura 6. Porcentagem de conversão de carbono para controle negativo de polietileno	32
Figura 7. Porcentagem de conversão de carbono para saco de lixo BioBag à base de amido de milho	32
Figura 8. Porcentagem de conversão de carbono para canudos de PLA	33
Figura 9. Porcentagem de conversão de carbono para prato de cana-de-açúcar	33
Figura 10. Porcentagem de conversão de carbono para saco Mirel	34
Figura 11. Porcentagem de conversão de carbono para saco Ecoflex	34
Figura 12. Porcentagem de conversão de carbono para saco Oxodegradável	35
Figura 13. Produção cumulativa de biogás de digestão anaeróbica	42
Figura 14. Produção cumulativa de biogás de digestão anaeróbica	42
Figura 15. Produção de biogás no 43º dia da digestão anaeróbica	43

## Lista de Tabelas

Tabela 1. Resultados de ensaio em seis ambientes diferentes de compostagem	4
Tabela 2. Informações sobre produção de plásticos degradáveis comercialmente disponíveis	9
Tabela 3. Informações sobre produção de plásticos degradáveis comercialmente disponíveis	10
Tabela 4. Polímeros biodegradáveis e compostáveis comercialmente disponíveis*	12
Tabela 5. Resumo de indicadores principais de estudos LCA [28]	13
Tabela 6. Limites de metal pesado segundo Padrões Europeus e dos Estados Unidos [38]	16
Tabela 7. Custos para itens compostáveis de louça plástica para a lanchonete da CSU, Chico	19
Tabela 8. Custos para itens convencionais de louça plástica para a lanchonete da CSU, Chico	19
Tabela 9. Conteúdo de carbono e porcentagem de umidade para amostras compostáveis	29
Tabela 10. Taxas de degradação para amostras compostáveis	30
Tabela 11. Fitotoxicidade do solo de composto	36
Tabela 12. Características dos substratos e da borra	41
Tabela 13. Resultados de teste de qualidade para LDPE e HDPE com oxo- e bio- contaminação	50
Tabela 14. Resultados de teste mecânicos para LDPE e HDPE com oxo- e bio- contaminação	51
Tabela 15. Resultados de teste mecânicos para LDPE e HDPE com oxo- e bio- contaminação	51

## Agradecimentos

Este relatório é a culminância do trabalho de muitas pessoas que representam muitas organizações. O autor gostaria de agradecer as seguintes pessoas e organizações pela ajuda e pelas recomendações:

- California Integrated Waste Management Board (CIWMB), que forneceu fundos para o projeto.
- Membros do conselho consultivo técnico pelos excelentes comentários e sugestões.
- Sr. Edgar Rojas e Sr. Mike Leao do CIWMB, por fornecerem excelente contribuição e direcionamento técnico para o projeto.
- Membros do comitê consultivo, que forneceram excelente assistência técnica durante a pesquisa. Esses membros incluem as seguintes pessoas: Dr. Robert Dorsey (Clorox), Sr. Lee Doty (Oxo Bio Organization), Sr. Evan Edgar (Edgar Inc), Sr. Steve Mojo (BPI), Dr. Ramani Narayan (MSU) e Dr. Robert Whitehouse (Metabolix Inc).
- Colegas do autor na California State University (CSU), Chico, por sua ajuda especializada em ensaios laboratoriais e desenvolvimentos experimentais, particularmente Dra. Cindy Daley, Sr. Tim Devine, Dr. Randy Miller e Sr. Don Sonnot.
- Aos seguintes alunos, que forneceram total suporte de pesquisa durante o projeto: Bret Bosma, Steven Foutes, Jonas Greminger, Nhu Huynh, Maisha Kamunde, Joel Klabo, Deepika Nayyar e Kate Taft.
- Doutores Hamed El-Mashad e Ruihong Zhang da U.C. Davis pela excelente colaboração sobre digestão anaeróbica.
- Às pessoas e organizações envolvidas nos negócios de gerenciamento de lixo, pela oportunidade de testar os materiais degradáveis em instalações de compostagem comerciais, incluindo o Dr. Fengyn Wang (NorCal Waste Systems), Chris Taylor (NorCal Waste Systems), Sr. Greg Pryor (Jepson Prairie Organics), Sr. Steve Engfer (Administração de Lixo do Município de Mariposa) e o Sr. Dale Wangberg (Empresa de Administração de Lixo, Instalação de Composto de Chico).

Produzido por CSU, Chico Research Foundation, sob contrato com a CIWMB. Os contatos são o Sr. Edgar Rojas (CIWMB, 916-341-6508) e o Dr. Joseph Greene (CSU, Chico, 530-898-4977).

## Resumo Executivo

Como uma maneira de conservar recursos, reduzir o lixo, e eliminar o lixo que danifica a vida marinha, as pessoas da Califórnia, eonegócios, organizações ambientais e governos locais estão cada vez mais interessados em alternativas para o uso de sacos plásticos e louças e talheres descartáveis. Em resposta, um número crescente de fabricantes está oferecendo produtos plásticos e embalagens que eles afirmam que se decompõem no ambiente ou através de compostagem. A presença crescente desses novos plásticos levanta um número de questões importantes para consumidores e para aqueles que fazem as políticas.

Em resposta, a California Integrated Waste Management Board (CIWMB), realizou uma parceria com a California State University (CSU), Chico para estudar e reportar o seguinte:

- O desempenho de uso projetado e a compostabilidade de produtos comercialmente disponíveis e embalagens que, conforme se afirma, são “compostáveis” e “degradáveis”.
- A degradabilidade de vários plásticos compostáveis comercialmente disponíveis sob condições laboratoriais.
- Quão bem produtos de plástico degradáveis se decompõem em instalações de compostagem reais e um ambiente marinho simulado.
- A possibilidade de plásticos degradáveis contaminarem plásticos reciclados convencionais.

## Produtos e Instalações para Ensaio

Os pesquisadores testaram vários produtos plásticos degradáveis, comercialmente disponíveis, em seis diferentes ambientes de compostagem e em um ambiente marinho simulado. Os ambientes de compostagem incluíram um laboratório e instalações reais de compostagem de lixo verde, esterco de vaca e palha, resíduos de alimentos, lixo sólido municipal e uma instalação *in-vessel* (sistemas fechados ou reatores biológicos) na ausência de oxigênio. Os possíveis efeitos de contaminação foram examinados testando-se química e mecanicamente as misturas moldadas de plásticos degradáveis e de plásticos reciclados.

## Resultados das Pesquisas

Os seguintes resultados são baseados nas condições experimentais descritas neste relatório:

1. Todos os produtos testados, exceto aqueles que se degradam quando expostos à luz do sol ou ao oxigênio, se desintegraram satisfatoriamente em operações de compostagem comercial dentro de um período de 180 dias. Especificamente, um mínimo de 60 por cento do carbono orgânico foi convertido em dióxido de carbono ao final do período de testes. Veja a Tabela 1.
2. Para todos os produtos, as quantidades mensuradas de chumbo e cádmio em composto final foram inferiores a um por cento dos níveis máximos permitidos.
3. Os canudos de ácido polilático (PLA), os sacos de polihidroxialcanoato (PHA), os sacos de Ecoflex, e os pratos de cana-de-açúcar e sacos de lixo à base de amido de milho não liberaram materiais tóxicos para dentro do composto, e mantiveram com sucesso o crescimento de novos tomateiros após dez dias.
4. Tampas de PLA, sacos de PHA, sacos de Ecoflex, sacos Husky e sacos de lixo à base de amido de milho degradaram-se completamente na instalação de compostagem fechada “*in-vessel*”. Entretanto, sacos oxodegradáveis e UV-degradáveis, sacos de plástico em polietileno de baixa densidade (LDPE), tampas em cana-de-açúcar e papel Kraft não se degradaram.
5. Os sacos em PHA se desintegraram um pouco na água do oceano; todos os outros produtos não se desintegraram de forma alguma.
6. Plásticos biodegradáveis e plásticos que se degradam em contato com oxigênio ou luz do sol reduzem a qualidade e prejudicam as propriedades mecânicas de produtos acabados fabricados com conteúdo reciclado.

## Recomendações

1. Realize pesquisa adicional para:

- Entender melhor o destino dos plásticos degradáveis em ambientes terrestres e marinhos e para compreender o efeito que os resíduos de degradação podem ter sobre a vida selvagem, as plantas e a vida marinha.

- Avaliar os custos de ciclo de vida incorridos durante a fabricação, coleta e reprocessamento de sacos compostáveis comparados aos custos incorridas ao administrar plásticos convencionais por meio de processamento, reciclagem e descarte. Os governos locais necessitam dessas informações, a fim de tomar decisões com base em dados sobre a utilização de sacos compostáveis.

2. Propor uma lei requerendo o desenvolvimento de um código de identificação para sacos e recipientes compostáveis, no intuito de identificar e separar plásticos compostáveis de plásticos recicláveis. A presença de material plástico degradável regulamentado em recipientes de plástico rígido, e em sacos de lixo, dificultaria a conformidade com a lei atual e, como indicado acima, reduziria as oportunidades de reciclagem de plástico.

A Tabela 1 resume o resultado do ensaio realizado nos seis diferentes ambientes de compostagem:

**Tabela 1. Resultados de ensaio em seis ambientes diferentes de compostagem**

PRODUTO TESTADO	1	2	3	4	5	6	CERTIFICADO Instituto de Produtos Biodegradáveis (BPI)	APROVADO EM ENSAIO DE PLANTA	APROVADO EM ENSAIO DE METAL
Prato ou tampa de cana-de-açúcar	●	●	●	●	●	●		●	●
Recipiente de PLA	●	NT	●	NT	NT	NT	●	●	●
Copo de PLA	●	NT	NT	NT	NT	NT	●	●	●
Tampa ou canudo de PLA	●	●	●	●	●	●	●	●	●
Saco de lixo BioBag à base de milho	●	●	●	●	●	●	●	●	●
Saco de PHA	●	●	NT	●	●	●	●	●	●
Saco de Ecoflex	●	NT	NT	●	●	●	●	●	●
Saco oxodegradável	x	x	NT	x	x	x		●	●

Nota: X denota ausência de biodegradação

Nota: ● denota biodegradação consistente com as normas ASTM

Nota: NT denota que não houve teste

1: Laboratório

4: Resíduos de alimentos

2: Lixo verde

5: Lixo Sólido Municipal (MSW)

3: Estrume de Vaca e Palha

6: In-vessel



## Introdução

O Conselho de Gerenciamento Integrado de Lixo (CIWMB) iniciou um programa de pesquisas para avaliar desempenho, índices de degradação e o impacto ambiental de embalagens plásticas degradáveis e louça plástica em instalações de compostagem operadas comercialmente e em ambientes marinhos simulados. O termo “degradável” abrange produtos comercializados como biodegradáveis, compostáveis, fotodegradáveis, oxodegradáveis ou degradáveis por meio de outros processos físicos ou químicos.

O Departamento de Engenharia Mecânica, Engenharia Mecatrônica e Tecnologia de Fabricação na California State University, Chico, realizou a pesquisa no laboratório de tecnologia de polímeros. Os objetivos do projeto de pesquisa foram:

1. Avaliar a eficiência de produtos plásticos degradáveis disponíveis comercialmente, com base na utilização desejada, degradabilidade, toxicidade e custo.
2. Gerar avaliações referentes à segurança do meio ambiente.
3. Avaliar o impacto de plásticos degradáveis no ciclo de reciclagem de plásticos.
4. Identificar necessidades de pesquisas futuras.

O projeto é dividido em quatro áreas, incluindo: um plano detalhado de trabalho e orçamento, revisão de literatura, testes de avaliação de desempenho em compostagem de tamanho natural e digestão anaeróbica, e relatório de avaliação.

Esta pesquisa é a continuação de um estudo prévio que apresentou os resultados de testes de biodegradação em vários plásticos compostáveis comercialmente disponíveis na Califórnia. A pesquisa descobriu que os materiais compostáveis se degradam sob condições compostáveis de laboratório, conforme especificada na ASTM D6400. O projeto de pesquisa anterior era um estudo inicial de vários materiais plásticos compostáveis comuns. A pesquisa não se voltou a outros produtos degradáveis nem métodos de compostagem *in-vessel* acelerados.

## **Informações Prévias**

### ***Plásticos Convencionais***

Os plásticos podem ser produzidos com materiais naturais ou sintéticos. Plásticos tradicionais com produção mundial anual de aproximadamente 140 milhões de toneladas [1], são tipicamente produzidos a partir de produtos que têm o petróleo como base. Alternativamente, polímeros biobaseados são produzidos a partir de materiais naturais, como, por exemplo, amido de milho, batata, tapioca, arroz, trigo etc.; óleos de semente de palma, linhaça, soja etc.; ou produtos de fermentação, como ácido polilático (PLA), polihidroxicanoato (PHA) e polihidroxibutirato (PHB).

Alguns produtos que têm como base o petróleo são considerados polímeros biodegradáveis, pois os mesmos são consumidos por micróbios no solo e são biodegradáveis em ambientes de compostagem. Por exemplo, os polímeros copoliéster aromático alifático da BASF™ e E-caprolactam são feitos a partir de materiais de petróleo e são consumidos por microorganismos.

A maior parte dos polímeros que tem como base o petróleo não é biodegradável. Entretanto, aditivos podem ser misturados, o que faz com que eles se comportem de maneira similar a um plástico biodegradável, fragmentando-se no solo.

Plásticos à base de petróleo, que possuem amido ou aditivos degradáveis como componente, não são biodegradáveis, uma vez que somente a porção de plástico que contém amido é consumida por micróbios no solo. Aditivos pró-degradantes são combinados com polietileno para produzir um polímero sintético oxodegradável, que faz com que o plástico se desintegre em pequenos fragmentos quando exposto ao oxigênio. Similarmente, plásticos fotodegradáveis possuem aditivos que fazem com que o plástico se desintegre à luz do sol.

O plástico fragmentado deixa pedaços pequenos no solo e pode levar décadas até desaparecer completamente. Além disso, por não serem consumidos por microorganismos, podem causar dano ambiental considerável a animais, em caso de ingestão.

### ***Plásticos Biodegradáveis***

Biodegradabilidade é definida como um processo no qual todos os fragmentos de materiais são consumidos por microorganismos como fonte de alimento e de energia. Polímeros biodegradáveis não podem possuir nenhum resíduo ou resto de produtos secundários.

O período de tempo exigido para biodegradação depende do ambiente do sistema de descarte, que pode ser aterro, composto aeróbico, digestão anaeróbica ou ambiente marinho. Há muitos tipos de polímeros biodegradáveis que se degradam em uma variedade de ambientes, incluindo aterros, luz solar, ambiente marinho ou composto. Os três componentes essenciais de biodegradabilidade são:

1. Que o material seja utilizado como fonte de alimento ou de energia para micróbios.
2. Que um certo período de tempo se faz necessário para a biodegradação completa.
3. Que o material seja completamente consumido no meio ambiente.

A maior parte dos materiais biobaseados é biodegradável, embora alguns materiais não o sejam. Por exemplo, poliésteres podem ser fabricados com óleo de soja, mas eles não são biodegradáveis, pois o polímero não é consumido por microorganismos. O poliuretano pode ser produzido por meio da reação de álcool orgânico com isocianato, mas não é biodegradável, por não ser também consumido por microorganismos.

As definições de plásticos biodegradáveis são da maior importância nos dias atuais. Todos os materiais plásticos são degradáveis, embora o mecanismo de degradação possa variar. A maior parte dos plásticos se degradará por meio da fragmentação das cadeias de polímero quando expostas à luz ultravioleta (UV), oxigênio, ou calor elevado. Estabilizantes são adicionados a polímeros para prevenir fragmentação quando expostos ao sol, calor e oxigênio.

A biodegradação ocorre quando microorganismos quebram as cadeias de polímeros consumindo o polímero como fonte de alimento. Muitos plásticos que se afirma serem biodegradáveis não são completamente consumidos por microorganismos, nem são completamente mineralizados. Adicionalmente, a biodegradação não especifica uma duração de

tempo para o completo desaparecimento do plástico. Ser considerado biodegradável significa também que a degradação ocorre dentro de um período de tempo razoável. O plástico tradicional com base de petróleo pode se degradar completamente em aproximadamente 100 anos. Por conseguinte, plásticos tradicionais não são biodegradáveis. A fim de se classificar um plástico biodegradável, considera-se, geralmente, um período de 180 dias.

Plásticos biodegradáveis podem degradar em instalações de compostagem e se fragmentar em água, metano, dióxido de carbono e biomassa. Microorganismos no solo ou composto degradam o polímero de maneiras que podem ser mensuradas por meio de testes padrão por períodos de tempo específicos. Plástico biodegradável pode ser definido, de acordo com Norma da Sociedade Americana para Testes e Materiais (American Society for Testing and Materials - ASTM) D6400, como um plástico degradável no qual a degradação resulta da ação de microorganismos, que ocorre naturalmente, como bactérias, fungos e algas.

O essencial para compreender a biodegradabilidade verdadeira é assegurar que o plástico irá se comportar como outros materiais orgânicos no solo, como por exemplo, folhas e gravetos. Materiais orgânicos desaparecem completamente por serem uma fonte de alimento para os organismos do solo. Com um bom ambiente de solo, tal como composto – que é de aproximadamente 60°C e umidade – os materiais orgânicos desaparecerão em um período de 180 dias e não deixarão nenhum pequeno fragmento ou resíduo. Plásticos verdadeiramente biodegradáveis devem se comportar da mesma forma e não deixar quaisquer partículas ou resíduos que possam prejudicar o solo.

Os efeitos gerais que os materiais degradáveis possuem nas propriedades físicas ou químicas do solo, bem como na ecologia do solo foram avaliados.<sup>[2]</sup> A degradação de vários biopolímeros melhorou a qualidade do solo, não resultou em nenhum resíduo, e teve um efeito ambiental positivo. Os biopolímeros incluíram base de amido, PHB, PLA, poliéster e copolímeros.<sup>[3]</sup> Os efeitos ecotóxicos de polímeros biodegradáveis após compostagem ou degradação no solo ou ambientes marinhos raramente são estudados. Pesquisas adicionais são necessárias no futuro para estudar o destino ambiental de materiais degradáveis.

### ***Plásticos Compostáveis***

“Compostável” é um termo ainda mais correto do que biodegradável. Compostável especifica que, em um ambiente de compostagem adequado, o plástico não somente se degrada completamente, mas é também consumido totalmente em 180 dias ou menos.

A norma ASTM D6400 define plásticos compostáveis como materiais que passam por degradação por meio de processo biológico durante a compostagem, para produzir dióxido de carbono, água, compostos inorgânicos e biomassa a uma taxa consistente com outros materiais compostáveis conhecidos e que não deixam resíduo visível distinto ou resíduo tóxico. Se um plástico degradável não estiver em conformidade com essas exigências, não pode ser classificado como “compostável” na Califórnia.<sup>[4]</sup>

Plásticos compostáveis podem então ser coletados juntamente com materiais compostáveis não plásticos e enviados para instalações de compostagem em vez de aterros. Infelizmente, nem todos os produtos classificados como biodegradáveis são também compostáveis. Essa exigência de compostagem pode levar a confundir a classificação do produto e a um mal-entendido em relação à biodegradabilidade aceitável.

Duas organizações independentes, o Conselho de Compostagem dos Estados Unidos (USCC) e o Instituto de Produtos Biodegradáveis (BPI), estabeleceram, em conjunto, procedimentos para a verificação de afirmações sobre se os produtos biodegradáveis são ou não compostáveis, e criaram um logo “compostável” para que se verifique a conformidade com os padrões sobre compostabilidade da norma ASTM D6400.<sup>[5]</sup>

O BPI, em conjunto com o USCC, realiza avaliações de produto em cada item que recebe o logo de “compostável”. O BPI fornece critérios importantes para testes válidos em tamanho natural de plásticos compostáveis.<sup>[6]</sup> O Programa de Logos do BPI tem o objetivo de certificar produtos que irão sofrer biodegradação e compostagem de maneira satisfatória em instalações de compostagem ativamente gerenciadas. A fim de ajudar os consumidores, o BPI fornece uma lista de produtos compostáveis certificados. Os produtos incluem sacos e filme, itens de louça plástica e resinas.

## Produtos Plásticos Degradáveis

Muitas comunidades estão interessadas em utilizar produtos biodegradáveis para reduzir a poluição causada por sacos plásticos leves. Por exemplo, São Francisco está solicitando que sejam usados sacos compostáveis ou recicláveis em supermercados, farmácias e outras lojas de comércio varejista.<sup>[7]</sup>

Similarmente, a instalação de compostagem da cidade de Hutchinson, MN, coletará lixo verde somente em sacos plásticos biodegradáveis.<sup>[8]</sup> Sacos biodegradáveis são enviados a cada quatro meses para aqueles que participam do programa de *orgânicos do meio-fio*. Todos os tipos de materiais orgânicos podem ser colocados nos sacos biodegradáveis, especialmente se o material exala cheiro, goteja ou pode ser levado pelo vento. O saco de compostagem EcoGuard distribuído pela cidade de Hutchinson converte-se em dióxido de carbono e água no período de algumas semanas após o descarte.

Na Europa, os sacos plásticos compostáveis estão disponíveis para serem usados como sacolas de supermercados, “sacos com nó” para frutas e vegetais, sacos de lixo de cozinha, e sacos de lixo de jardim.<sup>[9]</sup> A empresa Eastman Chemical abriu uma planta Eastar Bio no Reino Unido em 2002 com uma capacidade de produção de 33 milhões de libras por ano.<sup>[10]</sup>

Em 1999, o consumo de polímero total para sacos e sacolas plásticas na União Européia era da ordem de 2 a 2,5 milhões de toneladas por ano. O consumo total de todos os produtos de polímero biodegradáveis na União Européia foi estimado como sendo de 20.000 a 25.000 toneladas por ano.<sup>[11]</sup> Anualmente são usadas aproximadamente 8.000 toneladas de sacos plásticos Master-Bi™ da Novamont com base de amido de milho.<sup>[12]</sup>

Na Austrália, materiais de polímero biodegradável estão sendo usados em mercearias, no comércio varejista, e nas indústrias de compostagem, como sacos para frutas, iscas, pães e gelo.<sup>[13]</sup> A Austrália usa os padrões europeus para compostagem e certificação de plásticos biodegradáveis. Os sacos plásticos biodegradáveis estão disponíveis nas lojas locais de garrafas e lojas de bebidas alcoólicas. Os sacos que não danificam o meio ambiente são produzidos com plástico biodegradável Mater-Bi™. Na Austrália e na Europa, a empresa Cadbury Chocolates of Australia selecionou Plantic™, um polímero biodegradável da Plantic Technologies of Australia, para bandejas moldadas por temperatura para conter chocolates individuais dentro da sua caixa de chocolates. O material plástico compostável é fabricado com amido.

A Tabela 2 lista as aplicações de produtos, informações sobre fabricantes e capacidade de produção de diversos plásticos degradáveis disponíveis comercialmente. Os produtos de plástico incluem polímeros compostáveis, oxodegradáveis e UV-degradáveis.

Os produtos compostáveis são produzidos em maior volume a cada ano. Muitos fornecedores estão expandindo suas instalações de produção, a fim de atenderem à crescente demanda mundial para plásticos realmente biodegradáveis ou compostáveis. Com várias plantas de produção no mundo, o plástico biodegradável mais comum é o PLA. Ele tem sido utilizado com sucesso em recipientes rígidos e na cutelaria. Os plásticos à base de amido Mater-Bi™ são também usados em muitas aplicações em todo o mundo e estão expandindo as capacidades de produção. Os plásticos Mater-Bi™ são usados mais comumente para a produção de sacos e filmes. O Ecoflex® é também utilizado com muito sucesso para fabricar sacos e filmes.

Infelizmente, vários produtos de plástico com aditivos pró-degradantes são vendidos em todo o mundo e classificados como biodegradáveis, quando claramente não são degradados por microorganismos. Da mesma maneira, plásticos de polietileno misturados com amido são produzidos no mundo todo, e classificados como biodegradáveis, embora somente as partes de amido do plástico irão se biodegradar e desaparecer. O resto do plástico permanecerá no solo por décadas.

**Tabela 2. Informações sobre produção de plásticos degradáveis comercialmente disponíveis**

Nome Comercial	Aplicação do Produto	Fabricante - Local	Capacidade de Produção
Biomax™	Pratos, tigelas, recipientes	Dupont	10 milhões de libras por ano
Miral™ PHA	Filmes, chapas, copos, bandejas, recipientes	Metabolix Inc. EUA	100 milhões de libras por ano <sup>[14]</sup>
EASTER Bio	Sacos, filmes, <i>liners</i> , aplicações de fibra e <i>nonwovens</i>	Novamont NA Itália	33 milhões de libras por ano <sup>[15]</sup>
Plástico Ecovio PLA Ecoflex	Sacos, chapas, filme	BASF EUA	20 a 50 milhões de libras por ano
Resinas Cereplast	Copos para bebidas frias NAT-UR, recipientes para alimentos, cutelaria	Cereplast Corporation Hawthorne CA	40 milhões de libras por ano <sup>[16]</sup>
EcoFlex	Sacos, <i>liners</i> , filmes	BASF Dinamarca	60 milhões de libras por ano <sup>[17]</sup>
NatureWorks PLA	Copos para bebidas frias, recipientes para alimentos e cutelaria	Nature Works LLC Cargil-Dow - EUA	300 milhões de libras por ano <sup>[18]</sup>
Cana-de-açúcar Stalk Market	Recipientes para alimentos e cutelaria	Asean Corporation China	30 milhões de libras por ano
Resinas Mater-Bi	Sacos, <i>liners</i> , produtos de filmes	Novamont Corporation Itália	40 milhões de libras por ano <sup>[19]</sup>
Aditivos EPI para polietileno	Sacos, chapas, filmes, bandejas. O aditivo está disponível para muitos produtos plásticos.	Biocorp, Inc. Becker, MN, EUA	20 milhões de libras por ano
Aditivos degradáveis Oxo-UV para polietileno	Sacos, chapas, filmes, bandejas. O aditivo está disponível para muitos produtos plásticos.	EPI - Environmental Technologies Nevada, EUA	20 milhões de libras por ano
Polystarch master batch para polietileno	Sacos, chapas, filmes, bandejas, recipientes. O aditivo para o amido está disponível para muitos produtos plásticos.	Willow Ridge Plastics, Inc. Erlanger, KY, EUA	10 milhões de libras por ano

A Tabela 3 lista o tipo de polímero, extensão e taxa de degradação, tempo de vida útil, e certificação de vários plásticos degradáveis. Os polímeros degradáveis podem degradar aerobicamente em composto, aterro e ambientes marinhos. A taxa de decomposição depende da temperatura, conteúdo de umidade, e população de microorganismos no ambiente específico. Todos os plásticos compostáveis são certificados pelo BPI e, portanto, se mineralizam e biodegradam completamente em seis meses, sob condições de compostagem. Eles possuem também uma razoável vida útil de 12 a 18 meses. Os plásticos UV-degradáveis e os plásticos oxodegradáveis não são certificados como compostáveis e não se degradarão completamente em ambientes de compostagem no período de seis meses.

**Tabela 3. Informações sobre produção de plásticos degradáveis comercialmente disponíveis**

Nome Comercial	Fonte/Tipo de Polímero	Taxa e Extensão de Degradação (Ambiente)	Vida Útil	Certificado BPI	Certificado ISO
Biomax™	Poliéster misto alifático e aromático	Compostável em 6 meses (composto)	12 a 18 meses	Sim	Sim
Miral™ PHA	Poli- hidroxialcanoato via bactéria	Compostável em 6 meses (composto)	12 a 18 meses	Não	Não
EASTER Bio	Poliéster tereftalato polietileno (PET) modificado	Compostável em 6 meses (composto)	12 a 18 meses	Sim	Sim
Plástico Ecovio PLA Ecoflex	PLA-Ecoflex	Produto novo	A definir	Não	Não
Resinas Cereplast	Fontes orgânicas de plantas	Compostável em 6 meses (composto)	12 a 18 meses	Sim	Sim
EcoFlex	Poliéster misto alifático e aromático	Compostável em 6 meses (composto)	12 a 18 meses	Sim	Sim
NatureWorks PLA	Poliéster	Compostável em 6 meses (composto)	12 a 18 meses	Sim	Sim
Stalk market Cana-de-açúcar	Cana-de-açúcar	Biodegradável (composto)	12 a 18 meses	Não	Não
Resinas Mater-Bi	Família de bioplásticos que usa componentes vegetais, tais como, amido de milho, que foram modificados (ou complexados) com poliésteres biodegradáveis	Compostável em 6 meses (composto)	12 a 18 meses	Sim	Sim
Aditivos EPI para polietileno	Aditivo oxodegradável para HDPE e LDPE	Desintegra, mas não é compostável	2 a 3 anos	Não	Não
Aditivos degradáveis Oxo-UV para polietileno	Aditivo oxodegradável para HDPE e LDPE	Desintegra, mas não é compostável	2 a 3 anos	Não	Não
Polystarch master batch para polietileno	Amido e LDPE ou HDPE, e polipropileno (PP)	Desintegra, mas não é compostável	2 a 3 anos	Não	Não

Plásticos biodegradáveis que são certificados pelo BPI são completamente biodegradáveis em ambientes compostos. A bactéria, em solo e composto, consumirá os componentes orgânicos dos plásticos biodegradáveis. Veja a Tabela 4 para uma lista de plásticos biodegradáveis e compostáveis que degradam com segurança não deixando resíduo prejudicial.

A maioria dos plásticos compostáveis pertence à família do poliéster, incluindo o ácido polilático (PLA), que é manufaturado e fornecido pela NatureWorks, LLC. O PLA é produzido a partir da polimerização do ácido lático. É também conhecido como polilactídeo. O PLA é um polímero biodegradável muito comum que possui alta claridade para aplicações em embalagens. Pode ser também utilizado para copos e recipientes termo moldados, garfos, colheres, facas, embalagens de doces, revestimentos para copos de papel, filmes óticamente acentuados, e shrink labels.

Plásticos PLA são os plásticos biodegradáveis mais comumente usados por clientes ao redor do mundo. O PLA possui aplicações nos Estados Unidos, Europa, Japão, Austrália e outros países.

Em 1999, a Dow Chemical e a Cargill criaram a parceria chamada Cargill Dow, LLC, para tornar-se a maior produtora de ácido polilático biodegradável no mundo com capacidade anual de 140.000 toneladas por ano.<sup>[20]</sup> Em 2005, a Dow e a Cargill encerraram a parceria quando a Cargill comprou toda a participação da Dow Chemical na Cargill Dow, LLC.

Alguns produtos degradáveis são feitos de polímeros sintéticos que possuem aditivos que com o decorrer do tempo irão causar desintegração em ambientes externos. A EPI Environmental Technologies Incorporated fornece TDPA® (Aditivo Plástico Totalmente Degradável) para fabricantes de polietileno e polipropileno produzirem sacos plásticos, filmes, e produtos que degradam com o tempo.<sup>[21]</sup> Esse aditivo, cuja base não possui amido de milho, usa luz ultravioleta e oxidação para quebrar as cadeias de polímeros, resultando em uma redução do peso molecular do plástico. O aditivo é para ser utilizado em aplicações que requeiram contato com alimentos.<sup>[22]</sup> A tecnologia do aditivo TDPA® tem sido utilizada em produtos plásticos na América do Norte, Europa, Ásia, Austrália, e Nova Zelândia.

Os plásticos oxodegradáveis podem deixar pequenos fragmentos plásticos como resíduo, após a oxidação. Quando o amido é adicionado ao polietileno e depois degrada, um resíduo similar é deixado. Os microorganismos no solo digerem o amido, que faz com que o plástico seja fragmentado em pedaços menores.

Os plásticos de polietileno à base de amido estão disponíveis na Willow Ridge Plastics Incorporated. Os produtos *master-batch* de amido foram desenvolvidos para uso em *blown film*, moldes de injeção e outras aplicações com plásticos de polietileno, polipropileno e poliestireno.<sup>[23]</sup>

Em 1989, a Mobil Company produziu os sacos Hefty de polietileno com um aditivo de amido de milho. Quando expostos à luz solar, os sacos se fragmentavam em partículas plásticas menores, mas não se degradavam em aterros.<sup>[24]</sup> Os sacos de polietileno-amido não são certificados pelo BPI, e podem causar sérias conseqüências ambientais, uma vez que fragmentos de polietileno serão deixados no solo após a biodegradação do amido.

**Tabela 4. Polímeros biodegradáveis e compostáveis comercialmente disponíveis\***

<b>Material</b>	<b>Tipo</b>	<b>Fornecedor Distribuidor</b>	<b>Produtos</b>	<b>Produtos de Degradação</b>	<b>Extensão da Degradação</b>	<b>Norma</b>
Biomax™	copoliésteres alifáticos, PET modificado	Dupont/ www.allcompost.com	Revestimento e filme para embalagem de alimentos, sacos para sanduíche, utensílios, fibras	Dióxido de carbono, água, biomassa	De 2 a 4 meses em composto, dependendo da temperatura	ASTM D6400
Biopol™	PHB/V taxa de polibutil e ácido valérico	Metabolix Inc.	Descartes de consumo, recipientes, sacos para lixo, embalagem	Dióxido de carbono, água	20 dias em lodo, a um mês em composto	ASTM D6400 EN13432
Easter Bio™	copoliéster biodegradável	Produtos biodegradáveis p/embalagem Eastman Chemical Co./Farnell Packaging	Sacos para lixo, filme, liners	Dióxido de carbono, água, biomassa	De 2 a 4 meses em composto, dependendo da temperatura	ASTM D6400 EN13432
Ecoflex™	poliéster alifático aromático	BASF/ www.allcompost.com	sacos para composto, sacos para lixo, sacolas, sacos para frutas e vegetais	Dióxido de carbono, água, biomassa	De 2 a 6 meses em composto; dependendo da temperatura	ASTM D6400 EN13432
Mater-Bi™	amido de milho modificado com poliésteres biodegradáveis	Novamont/BioBag Corporation	Sacos para lixo, sacos para gramado e jardim	Dióxido de carbono, água, biomassa	De 3 a 6 meses em composto; dependendo da temperatura	ASTM D6400 EN13432, BPI
Nature Works™	ácido polilático (PLA)	Cargill Dow/ Biodegradable Food Service, Eco Products, Inc.	Copos claros, clamshells, tigelas para salada	Dióxido de carbono, água	De 1 a 3 meses em composto; dependendo da temperatura	ASTM D6400 EN13432

\*Nota: Os polímeros estão disponíveis nas seguintes quantidades: saco, Gaylord ou cargas de caminhão.



## Avaliação do Ciclo de Vida de Plásticos Biodegradáveis e Convencionais

A Avaliação do Ciclo de Vida Ambiental (LCA) é um método desenvolvido para avaliar os custos ambientais globais de se usar um material em particular. A LCA inclui o inventário e a mensuração de sistemas de entradas e saídas e depois os organiza e converte em temas ou categorias ambientais relativos ao uso de recursos, saúde humana, e áreas ecológicas.<sup>[25]</sup> A LCA consiste de três estágios:

1. Inventário do ciclo de vida
2. Avaliação do impacto do ciclo de vida
3. Melhora do ciclo de vida <sup>[26]</sup>

O primeiro estágio do inventário inclui o estabelecimento de um objetivo e da abrangência da análise, o que determina a extensão do trabalho a ser realizado e os procedimentos a serem utilizados. Adicionalmente, o primeiro estágio inclui a mensuração das entradas e saídas de um sistema, incluindo todas as emissões em uma base de volume ou massa (exemplo, quilograma de CO<sub>2</sub>, quilograma de cádmio, metro cúbico de lixo sólido).

A avaliação de impacto, ou estágio de interpretação, liga os resultados do inventário a potenciais problemas ambientais.

E o terceiro estágio, melhora do ciclo de vida, sugere mudanças para reduzir ou eliminar qualquer impacto negativo no meio ambiente.

No caso de plásticos, a LCA faz o relatório de todas as entradas e saídas necessárias para produzir um quilo de material (resina de polímero).

No *Manual de Polímeros Biodegradáveis*, a análise de ciclo de vida do PLA, Mater-Bi<sup>TM</sup>, PHA, e de outros plásticos biodegradáveis de treze publicações são comparados.<sup>[27]</sup> A Tabela 5 é um resumo dos indicadores principais de LCA para diversos polímeros biodegradáveis e plásticos convencionais. Os resultados adotam uma unidade funcional de 1 quilo de plástico.

**Tabela 5. Resumo de indicadores principais de estudos LCA <sup>[28]</sup>**

Tipo de plástico	Uso de energia não renovável da origem ao termo (MJ por quilo)	Tipo de tratamento de lixo	Efeito estufa Emissões de gás (kg CO <sub>2</sub> por quilo)
LDPE	80.6	Incineração	5.04
PET (garrafa)	77	Incineração	4.93
Policaprolactone (PLC)	83	Incineração	3.1
Mater-Bi <sup>TM</sup> grau de filme de amido	53.5	Incineração	1.21
PLA	57	Incineração	3.84
PHA	81	Incineração	Não disponível

Entretanto, este resumo está sujeito a incertezas, uma vez que não representa abordagens uniformes para a LCA. O motivo é que os estudos das pesquisas utilizaram unidades funcionais diferentes. A incineração é um método comum de descartar materiais na Europa. A compostagem é mais comum nos Estados Unidos e requer muito menos energia, além de ser uma alternativa mais sustentável.

Muito pouca pesquisa sobre LCA está disponível para soluções de compostagem. O número de LCAs para polímeros biodegradáveis é limitado. Não foram publicadas LCAs amplas para PLA (baseados em planta), polímeros de celulose (baseados em planta), ou para polímeros biodegradáveis à base de petróleo tais como o Ecoflex.

Uma análise do ciclo de vida de sacos fabricados com Mater-Bi™, mostrou que eles tiveram um impacto ambiental melhor do que sacos de papel, e que são comparáveis a sacos fabricados em polietileno que são separadas do lixo e incineradas sozinhos.<sup>[29]</sup>

NatureWorks® polylactide (PLA) é um polímero versátil produzido pela Nature Works, LLC.<sup>[30]</sup> O polímero NatureWorks® exige menos recursos fósseis para a sua fabricação, e emite significativamente menos gases que ocasionam o efeito estufa, do que a maior parte dos plásticos tradicionais. O processo de produção do polímero NatureWorks® - desde a sua origem até a porta da fábrica - utiliza atualmente 62 a 68 por cento menos recursos de combustível fóssil do que os materiais plásticos tradicionais, como tereftalato de polietileno (PET), poliestireno (PS), polipropileno (PP), polietileno de alta densidade (HDPE), e polietileno de baixa densidade (LDPE).<sup>[31]</sup>

## **Padrões Atuais para Plásticos Biodegradáveis**

Várias organizações mundiais estão envolvidas no estabelecimento de padrões para plásticos biodegradáveis e compostáveis, incluindo a American Society for Testing and Materials (ASTM), o European Committee for Standardization (CEN), a International Standards Organization (ISO), o German Institute for Standardization (DIN), o Japanese Institute for Standardization (JIS), e a British Plastics Federation. Os padrões estabelecidos por essas organizações ajudaram a indústria a criar produtos biodegradáveis e compostáveis que estão em conformidade com a crescente demanda mundial, para que os plásticos não sejam prejudiciais ao meio ambiente. [32]

A Alemanha, os Estados Unidos e o Japão estão cooperando no desenvolvimento de esquemas de certificação para tornar possível a certificação cruzada internacional de produtos, a fim de que o produto certificado em um desses países seja automaticamente passível de certificação em um outro.

### ***Estados Unidos***

Nos Estados Unidos, a norma ASTM D6400 é o padrão aceito para avaliar plásticos compostáveis. O padrão da norma ASTM D6400 especifica os procedimentos para certificar que plásticos compostáveis se degradarão em instalações municipais e industriais de compostagem aeróbica durante o período de 180 dias.[33] O padrão estabelece os requerimentos para classificar materiais e produtos, incluindo embalagens feitas de plásticos, a serem designadas como “compostáveis em instalações de compostagem municipais e industriais”. O padrão determina se plásticos e produtos feitos de plástico terão compostagem satisfatória, incluindo biodegradação, a uma taxa comparável àquela de materiais compostáveis conhecidos. Os padrões asseguram que a degradação dos materiais não contaminará o local composto, nem diminuirá a qualidade do composto final.

A norma ASTM D6400 utiliza a norma ASTM D6002 como orientação para avaliar a compostabilidade de plásticos ambientalmente degradáveis, em conjunção com a norma ASTM D5338, para determinar biodegradação aeróbica sob condições controladas de compostagem. A norma ASTM D6400 especifica que uma taxa satisfatória de biodegradação é a conversão de 60 por cento do carbono orgânico no plástico em dióxido de carbono, em um período de tempo não superior a 180 dias. Se um polímero biodegradável não cumprir com as exigências relacionadas na norma ASTM D6400 ou na EN13433, não será considerado compostável. Ele deve degradar no espaço de tempo especificado, sem deixar qualquer resíduo no composto.[34]

Nesta pesquisa, a norma ASTM D6400 foi seguida ao se testar a compostabilidade de diversos recipientes rígidos de embalagem, sacos, e cutelaria produzidos com plásticos biodegradáveis e compostáveis.

Plásticos compostáveis estão sendo utilizados com segurança nos Estados Unidos, com o auxílio de um programa de certificação e o estabelecimento dos padrões da norma ASTM D6400. O BPI e o Conselho de Compostagem dos Estados Unidos (USCC) estabeleceram o programa Logo Compostável nos Estados Unidos.[35] A certificação BPI demonstra que materiais plásticos biodegradáveis atendem às especificações da norma ASTM D6400, e que a biodegradação será rápida e segura durante a compostagem municipal e comercial. Vários plásticos degradáveis, que estão disponíveis para compostagem, foram certificados como “compostáveis” em 2002.[36] O logo “compostável” auxilia os consumidores a identificar quais produtos atendem o padrão da norma ASTM D6400. [37] Para assegurar objetividade, a verificação do padrão ASTM é obtida por meio de um consultor independente terceirizado selecionado pelo fabricante.

A biodegradação dos plásticos biodegradáveis em ambientes marinhos baseia-se nas normas ASTM D6691 e ASTM D7081. A norma ASTM D6691 é um método de teste para determinar a biodegradação aeróbica de materiais plásticos por um consórcio microbial definido no ambiente marinho. A norma ASTM D7081 é uma especificação padrão para plásticos biodegradáveis não-flutuantes em ambientes marinhos. Ambos os padrões requerem também a mensuração da quantidade de CO<sub>2</sub> gerada durante o processo de degradação. Uma amostra de ensaio demonstra biodegradação satisfatória se, após 180 dias, 30 por cento ou mais, da amostra estiver convertida em dióxido de carbono.

Conforme mostrado na Tabela 8, os limites de metal pesado no padrão europeu são mais rigorosos do que aqueles relacionados nos padrões dos Estados Unidos.

**Tabela 6. Limites de Metal Pesado Segundo Padrões Europeus e dos Estados Unidos<sup>[38]</sup>**

	<b>Chumbo</b>	<b>Cádmio</b>	<b>Cromo</b>	<b>Cobre</b>	<b>Níquel</b>	<b>Zinco</b>	<b>Mercúrio</b>
Europa	30 mg/kg	0.3 mg/kg	30 mg/kg	22.5 g/kg	15 mg/kg	100 mg/kg	0.3 mg/kg
E.U.A.	150 mg/kg	17 mg/kg	*	750 mg/kg	210 mg/kg	1400 mg/kg	8.5 mg/kg

\* Não especificado

A norma EN13432 permite uma quantidade limitada de concentração de metal pesado. Níveis aceitáveis de metais pesados em borra de esgoto são fornecidas pela US EPA, Sub-parte 503-13. Um ensaio em cinco sacos de lixo biodegradáveis constatou que o conteúdo de metal pesado era inferior aos padrões permitidos. Pigmentos coloridos verdes e azuis fazem com que a quantidade de cobre aumente no solo.<sup>[39]</sup> Pigmentos amarelos pesados podem fazer com que a quantidade de chumbo aumente no solo.

### **Europa**

Na Europa, plásticos compostáveis são utilizados em diversas aplicações. Os plásticos compostáveis devem estar em conformidade com a norma europeia EN13432. A norma EN13432 exige que 90 por cento de um material plástico compostável se fragmente em H<sub>2</sub>O, CO<sub>2</sub>, e biomassa, dentro de um período de seis meses

O DIN-Certco é um sistema de certificação muito conhecido, e comumente utilizado na Europa.<sup>[40]</sup> Materiais de amostra são testados para metais regulamentados, contaminantes orgânicos, degradação completa, desintegração sob condições de compostagem, e fitotoxicidade.<sup>[41]</sup> Os metais regulamentados e os testes químicos orgânicos asseguram que, nem os contaminantes orgânicos, nem os metais pesados como chumbo, mercúrio e cádmio possam entrar no solo por meio dos materiais biodegradáveis. Os procedimentos para testar a biodegradação completa no laboratório, e a desintegração sob condições de composto, asseguram que os materiais sejam completamente degradados durante um ciclo de processo de uma planta de compostagem padrão. A certificação de compostagem DIN é muito similar à certificação BPI.

### **ISO**

A Organização Internacional de Padronização (ISO) é uma rede dos institutos de padronização nacional de 157 países que estão de acordo no que se refere a especificações e critérios a serem aplicados consistentemente na classificação de materiais, na fabricação e fornecimento de produtos, em testes e análises, em terminologia, e no fornecimento de serviços.<sup>[42]</sup> A ISO 14855 estipula a conversão de porcentagem de carbono para dióxido de carbono emitido, bem como a taxa de conversão, e o grau de desintegração de plástico ao final do teste. A ISO 14852 determina a biodegradabilidade aeróbica final de materiais plásticos em um meio aquoso. O método de teste mensura o dióxido de carbono emitido e é semelhante aos padrões ASTM.

### **Austrália**

O padrão australiano para plásticos degradáveis inclui métodos de teste para validar a biodegradação de plásticos degradáveis. Ele certifica polímeros degradáveis que estão em conformidade com a norma europeia EN 13432.<sup>[43]</sup> A norma prevê a extensão de áreas de aplicação potenciais e ambientes de descarte na Austrália. A norma não exclui papel Kraft, como fazem algumas normas europeias. O papel Kraft é excluído como controle positivo, devido à presença potencial de poluentes sulfonados. Um controle positivo mais eficiente pode ser o filtro de papel celulose ou microcelulose AVICEL PH101.

O padrão australiano foi desenvolvido com relação a padrões internacionais existentes. O padrão diferencia plásticos biodegradáveis de outros plásticos degradáveis, como faz a norma ASTM D6400. Ele distingue claramente entre biodegradação e desintegração abiótica; embora ambas demonstrem que o plástico se degradou suficientemente, dentro do período de tempo de teste especificado. O padrão é modelado de acordo com a ASTM D5152, e é focado em questões relacionadas ao destino do meio ambiente e à toxicidade. Por fim, o padrão australiano é mais

restritivo do que a norma ASTM D6400, pois afirma que a mineralização total deve ocorrer em 180 dias; isto é, todo plástico é convertido em dióxido de carbono, água, compostos inorgânicos e biomassa sob condições aeróbicas, em vez de desintegrar em finos fragmentos indistinguíveis e mineralização parcial. [44]

A *Standards Australia Incorporated* está desenvolvendo dois padrões distintos para materiais compostáveis e oxodegradáveis. Os padrões de rascunho - *draft* - são baseados em padrões internacionais estabelecidos. A norma DR 04425CP baseia-se na ISO 14855-99 para determinar a biodegradabilidade aeróbica final e a desintegração de materiais plásticos sob condições de compostagem controladas. A norma DR 04424CP determinará a biodegradabilidade aeróbica final e a desintegração de materiais plásticos em um meio aquoso. O comitê de normas estabeleceu dois subgrupos para desenvolver as normas: um para plásticos biodegradáveis e o segundo para outros tipos de plásticos degradáveis, incluindo plásticos oxodegradáveis e fotodegradáveis.<sup>[45]</sup>

### **Japão**

As normas japonesas JIS são atendidas pelo sistema de certificação GreenPLA. O sistema GreenPLA possui requerimentos de teste muito similares aos dos métodos de certificação dos Estados Unidos e da Europa. Em particular, a certificação GreenPLA assegura a biodegradabilidade mensurando:

1. Evolução do dióxido de carbono após biodegradação microbial.
2. Mineralização (a capacidade de se desintegrar e não deixar fragmentos visíveis após compostagem).
3. Compatibilidade orgânica (a capacidade do composto de manter o crescimento da planta).

A norma JIS exige a mesma quantidade de evolução de dióxido de carbono que a norma ASTM D6400 para certificação: 60 por cento em 45 dias. Os mesmos 11 metais regulados são monitorados na GreenPLA como na EN 13432. Entretanto, vários aspectos da certificação são diferentes das certificações US BPI e Din-Certco européia. A certificação GreenPLA requer dados de segurança toxicológica em relação ao material plástico biodegradável tanto de testes de toxicidade aguda oral com ratos, quanto de testes de segurança ambiental com algas, dáfnia ou peixes. <sup>[46]</sup>

## **Custos de Plástico Biodegradável e Compostável**

Produtos de plástico compostável são mais caros do que produtos de plástico convencionais devido, em parte, ao seu baixo volume de produção. Se mais produtos forem comprados e a taxa de produção aumentar, o preço deverá ser reduzido. Produtos de plástico biodegradável atualmente no mercado são de duas a dez vezes mais caros do que produtos de plástico tradicional. O custo de poliésteres biodegradáveis varia de \$1.50 a \$2.00 por libra. O alto custo do plástico compostável é uma desvantagem quando comparado a papel, LDPE, PP, PS, e PET. Uma empresa australiana está tentando produzir plásticos biodegradáveis mais acessíveis, incorporando materiais de baixo custo e métodos de processamento. [47]

A Nat-UR Serviço de Cutelaria de Alimentação fornece colheres, facas e garfos a um preço de \$15.50 por 240 peças. Eles vendem também sacos de lixo compostáveis para os residentes de São Francisco. O custo de 40 sacos do tamanho de 20 galões (1 galão americano = 3.785 litros) é de \$19. Eles também oferecem pratos e um saco de lixo ao custo de \$24 por 100 pratos e \$24 por 40 sacos do tamanho de 40 galões, respectivamente. Copos plásticos estão também disponíveis ao custo de \$26 por 100 copos de 10 onças (1 onça = 29.753 mililitros). Todos os produtos afirmam atender as normas ASTM D6400-99.

Várias empresas fornecem recipientes de embalagem em plástico rígido (RPPC), cutelaria e sacos compostáveis.[48] O PLA da NatureWorks® é transformado em vários tipos de recipientes, incluindo copos, tampas, pratos e recipientes de armazenamento. O custo de 1000 peças pode variar de \$25 a \$145.[49]

Outros sacos e copos não prejudiciais ao meio-ambiente e biodegradáveis estão disponíveis na BioBag USA Corporation.[50] Os sacos são produzidos de materiais Mater-Bi. Todos os produtos BioBag atendem a norma ASTM D6400 referente a degradação e resíduos seguros, são certificadas pela organização US Composting Council e estão em conformidade com a lei estadual da Califórnia com relação a biodegradação. Os produtos BioBag estão disponíveis para sacos e *liners*, sacolas para compras, produtos para animais de estimação, sistemas de compostagem, Agro Film, e sistemas para banheiros. BioBags para varejo estão disponíveis para sacos de cozinha, filme para jardim, sistemas para banheiros, e sacos para lixo verde. Copos de plástico biodegradável também estão disponíveis. Os custos variam de \$0.08 a \$0.20 por saco e de \$0.07 a \$0.14 por copo. O custo de sacos plásticos biodegradáveis é caro se comparado ao custo de sacos de polietileno típicos ao preço de \$0.01 a \$0.02 por saco.

Algumas organizações ambientais argumentam que o preço mais barato de plásticos tradicionais não reflete seu valor real se consideradas as despesas de descarte e o impacto ambiental. Os custos reais de plásticos compostáveis podem ser compensados pelo custo do descarte. O Estado da Califórnia tem uma despesa anual estimada em mais de \$750 milhões para limpar e desviar o lixo plástico para aterros. [51] O plástico representa 50 a 80 por cento do volume de lixo coletado em ruas, parques e praias e 90 por cento de lixo flutuante no ambiente marinho. Em 2005, o Departamento de Transporte da Califórnia gastou \$16 milhões limpando o lixo de estradas da Califórnia. [52]

### ***Estudo de Caso de Custos na CSU Chico***

Os custos de descarte na CSU, Chico foram estudados no projeto de pesquisa. Durante uma semana, produtos de plástico compostáveis substituíram os produtos plásticos padrão na lanchonete do campus da universidade. Os produtos compostáveis foram coletados e separados para remover os itens não compostáveis e depois enviados para a fazenda da universidade para compostagem. Os custos de descarte foram monitorados e comparados aos custos semanais típicos.

Várias empresas fornecem Recipientes para Embalagem em Plástico Rígido (RPPCs), cutelaria, e sacos, que são vendidos por meio de varejistas e distribuidores.[53] Três delas são: Eco-Products do Colorado, Biodegradable Food Service do Oregon, e NAT-UR Store da Califórnia. Os produtos incluem: sacos de lixo, sacos para estoque, produtos para animais de estimação, sacos para grama e folhas, e itens típicos de louça plástica, como por exemplo, copos, pratos, e utensílios. A Eco-Products forneceu uma quota de produtos para serem utilizados durante uma semana na lanchonete da CSU, Chico.

A Tabela 6 lista os custos e os produtos compostáveis. Os custos de itens de plástico convencionais estão disponíveis no portal [www.foodservicedirect.com](http://www.foodservicedirect.com) e estão listados na Tabela 7. A O custo da utilização de produtos compostáveis é a diferença entre os dois custos, ou \$1,561 por semana. Os custos extras podem ser compensados pelos custos reduzidos para descarte, uma vez que os produtos descartados serão compostados em uma instalação aeróbica *in-vessel* na fazenda da universidade, e não enviados para um aterro.

**Tabela 7. Custos para itens compostáveis de louça plástica para a lanchonete da CSU, Chico**

	Produto	Volume Semanal	Preço Unitário	Custo
1	Prato: 9". BioCane sem branqueador	5000	\$0.11	\$550
2	Prato oval: 10" BioCane sem branqueador	5000	\$0.10	\$500
3	Prato: prato de três itens. BioCane sem branqueador	5000	\$0.11	\$550
4	Copo: 16 oz PLA	10000	\$0.09	\$900
5	Copo: 24 oz PLA	10000	\$0.07	\$700
6	Recipiente para salada 6" x 6" com tampa: PLA	5000	\$0.14	\$700
7	Container para viagem: PLA	5000	\$0.22	\$1,100
8	Garfo: PLA	5000	\$0.04	\$200
9	Tampa: PLA	10000	\$0.04	\$400
10	Canudo: PLA	10000	\$0.01	\$80
11	Saco para lixo: 55 galões: amido de milho	500	\$1.00	\$500
12	Saco para lixo de escritório - dez galões: amido de milho	100	\$0.12	\$12
	Total			\$6,192

**Tabela 8. Custos para itens convencionais de louça plástica para a lanchonete da CSU, Chico**

	Produto	Volume Semanal	Preço Unitário	Custo
1	Prato: Prato de 9"	5000	\$0.03	\$166
2	Prato oval: 10"	5000	\$0.14	\$677
3	Prato: prato de três itens	5000	\$0.15	\$737
4	Copo: 16 oz	10000	\$0.06	\$584
5	Copo: 24 oz	10000	\$0.06	\$584
6	Recipiente para salada 6" x 6" com tampa	5000	\$0.12	\$611
7	Container para viagem	5000	\$0.09	\$450
8	Garfo	5000	\$0.03	\$141
9	Tampa	10000	\$0.04	\$384
10	Canudo	10000	\$0.01	\$80
11	Saco para lixo: 55 galões	500	\$0.42	\$209
12	Saco para lixo de escritório de dez galões	100	\$0.09	\$9
	Total			\$4,631

Plásticos compostáveis são mais caros do que plásticos com base de petróleo. O desempenho do plástico compostável é limitado primeiramente por exigências de baixa temperatura e alto custo. O plástico compostável PLA possui uma temperatura máxima de uso de 60°C. O desempenho da temperatura pode ser melhorado com a adição de reforços naturais ou *nonocomposites*.

O custo dos plásticos compostáveis pode ser reduzido se volumes maiores forem produzidos ao se expandir instalações de produção. O custo dos plásticos compostáveis deve ser reduzido nos próximos anos e o custo se tornará similar ao dos plásticos com base de petróleo.



## Degradação, Resíduos, Toxicidade e Segurança do Plástico Degradável

Os subprodutos da biodegradação de polímeros compostáveis possuem efeito ambiental mínimo. Os subprodutos dos plásticos compostáveis são água, CO<sub>2</sub>, e uma biomassa similar à biomassa de plantas. O resíduo de biomassa fornece emendas de carbono e nitrogênio, conforme é absorvido pelo solo.

Plásticos degradáveis podem se fragmentar em partículas menores, se misturados a um aditivo para facilitar a degradação. Entretanto, sacos plásticos oxodegradáveis em ambientes de composto podem levar vários anos para biodegradar, dependendo da quantidade de exposição à luz solar e ao oxigênio.<sup>[54]</sup> Sacos plásticos de polietileno produzidos com aditivos de amido também degradam parcialmente com o tempo, na medida em que microorganismos digerem o amido, mas, deixam o polietileno intacto.

Plásticos degradáveis se fragmentam de uma ou duas formas:<sup>[55]</sup>

- **Desintegração:** ocorre quando os materiais plásticos se fragmentam e não são mais visíveis, mas o polímero ainda mantém um comprimento de cadeia finito.

- **Mineralização:** ocorre após o processo de oxidação inicial, e as cadeias de polímero são metabolizadas por microorganismos no dióxido de carbono, água e biomassa.

Polímeros oxodegradáveis se rompem em fragmentos pequenos com o decorrer do tempo, mas não são considerados biodegradáveis, uma vez que não atendem a taxa de degradação ou o conteúdo livre de resíduos especificados na norma ASTM D6400. Os plásticos se desintegram, mas deixam pequenos fragmentos de plásticos no composto, o que viola a norma ASTM D6400.

### Resultados de Estudos Similares de Plásticos Biodegradáveis

O Mater-Bi™ é um polímero completamente compostável, baseado em uma mistura de ao menos 50 por cento de amido e poliéster degradável hidrofílico sintético. O polímero foi avaliado quanto à adequação em descarte por compostagem.<sup>[56],[57],[58]</sup> Os resultados indicam que o Mater-Bi é prontamente degradável em testes padrão de biodegradação em laboratório, incluindo um teste semi-contínuo de borra ativada (SCAS) para simular a fragmentação em plantas de tratamento de descarte de água municipal e sistemas de compostagem piloto. A taxa de degradação dos sacos Mater-Bi™ depende da formulação exata utilizada, e das propriedades físicas do produto. Os testes de toxicidade, realizados com os sacos Mater-Bi™ e produtos compostados, mostraram que eles são atóxicos em testes padrão em animais e plantas.

A degradação biológica do copoliéster alifático aromático, Ecoflex®, foi investigada avaliando-se o grau de degradação e os intermediários que são formados durante o processo de degradação.<sup>[59]</sup> Nenhum efeito toxicológico significativo foi observado, nem para os monoméricos intermediários, nem para os intermediários oligoméricos. O risco do Ecoflex em um processo de compostagem foi avaliado como mínimo, e não indica risco ambiental. É necessário pesquisar mais para avaliar os riscos ambientais e o destino dos produtos intermediados de outros plásticos biodegradáveis em ambientes de compostagem.

### Biodegradação

A pesquisa documentada neste relatório é uma continuação de um estudo de pesquisa prévia sobre a biodegradação de vários plásticos compostáveis, comercialmente disponíveis na Califórnia. Tal pesquisa concluiu que os materiais compostáveis se degradam sob condições laboratoriais compostáveis, conforme especificado na norma ASTM D6400.<sup>[60]</sup>

Os resultados da degradação e da desintegração na fazenda da universidade demonstraram que os materiais compostáveis degradam em umidade, composto à base de estrume em 90 dias. A bandeja à base de amido de batata, o saco de lixo à base de amido de

milho, prato de PLA, canudo de PLA, e o recipiente de PLA degradaram de maneira similar a do controle de celulose.

Os resultados da degradação e da desintegração na instalação de compostagem municipal demonstraram que os materiais compostáveis degradam em composto de lixo verde úmido. O recipiente de PLA, o copo de PLA e a faca de PLA degradaram de maneira similar ao controle de celulose Avicell e degradou completamente em sete semanas. O saco de lixo à base de amido de milho e o prato de cana-de-açúcar degradaram a uma taxa similar ao controle de papel Kraft. Os três materiais degradaram de 80 a 90 por cento após 20 semanas.

A biodegradabilidade de cinco sacos de lixo biodegradáveis diferentes foi analisada de acordo com a norma DIN.<sup>[61]</sup> Os testes provaram que um polímero biodegradável pode ser degradado sob condições controladas de compostagem. Os sacos foram produzidos com amido de milho, policaprolactone (PCL) e papel Kraft. O PCL é um poliéster biodegradável, usado com frequência como aditivo para resinas, a fim de melhorar suas características de processamento enquanto abaixa os custos e aumenta a biodegradabilidade. Os resultados demonstraram que todos os cinco produtos plásticos se decompuseram segundo as normas europeias de 60 por cento no período de seis meses. Os sacos foram considerados totalmente biodegradáveis, uma vez que eles degradaram e desintegraram por meio de fragmentação em dióxido de carbono e água, e não deixaram resíduo tóxico no solo. Os sacos não são considerados compostáveis, uma vez que não foram testados quanto a fitotoxicidade.

### **Toxicidade**

Os materiais compostáveis também não devem deixar qualquer resíduo tóxico ou químico que afete negativamente a qualidade do solo do composto. A qualidade do composto pode ser avaliada usando-se critérios analíticos e biológicos, incluindo densidade do solo, sólidos secos totais, conteúdo de sal, conteúdo de nutrientes inorgânicos, e comportamento ecotoxicológico.<sup>[62]</sup> Os nutrientes inorgânicos avaliados no composto são nitrogênio total, fósforo, magnésio ou cálcio, e amônia-nitrogênio. Os testes ecotoxicológicos incluem determinação de inibição de crescimento com plantas de tomate e rabanete.

O teste de fitotoxicidade no composto acabado que contém polímeros degradados pode determinar se a construção de materiais inorgânicos dos plásticos é danosa para plantas e colheitas, e se elas tornam a produtividade do solo mais lenta.<sup>[63]</sup> A norma ASTM 6002 estabelece os padrões de teste de fitotoxicidade. O procedimento ASTM determina a fitotoxicidade por meio de mistura do composto contendo o material plástico compostável com solo de composto. A sobrevivência e o crescimento da planta que surge são então avaliados. Geralmente são testadas três espécies de plantas. Os resultados de composto contendo material plástico são comparados a composto sem material plástico, e um controle de solo.<sup>[64]</sup> As espécies de plantas podem ser tomate, pepino, rabanete, centeio, cevada, ou grama. Os testes de biomassa da planta podem revelar diferenças de qualidade entre compostos, e podem indicar tensão potencial da planta induzida pelo composto no nível usado no teste.<sup>[65]</sup>

O copo e o recipiente de PLA, o prato de cana-de-açúcar, e o saco de lixo à base de amido de milho atenderam as exigências de fitotoxicidade e sustentaram o crescimento dos novos tomateiros após dez dias. As amostras de solo dos materiais compostáveis não deixaram qualquer resíduo tóxico, e tiveram muito pouco metal pesado detectável, isto é, chumbo e cádmio eram 100 vezes mais baixos do que os limites estabelecidos.

### **Segurança**

Uma avaliação de segurança dos plásticos biodegradáveis está listada nas fichas de dados de segurança de material (MSDS) de cada produto. A MSDS para o plástico Ecoflex afirma que o plástico quente pode causar queimaduras térmicas, e que contato freqüente ou prolongado da pele pode causar irritação. Entretanto, a MSDS não fornece qualquer dado referente a toxicidade humana, de plantas, ou aquática. O perigo global para a saúde relacionado ao Ecoflex é classificado como baixo.

A MSDS para o plástico biodegradável Novomont Mater-Bi afirma que não há evidência de efeitos prejudiciais aos olhos, pele ou pulmões relacionados a esse produto. Adicionalmente, a MSDS atesta que o produto Novomont não é prejudicial à saúde se manuseado corretamente.

A MSDS para o plástico PLA afirma que o contato com as fibras PLA pode causar irritação da pele, que as fibras PLA podem causar desconforto em indivíduos que sofrem de bronquite ou asma, e que o PLA não é perigoso se absorvido pela pele ou inalado. O perigo global para a saúde relacionado ao PLA é classificado como baixo.

Os riscos para a saúde relacionados ao PHA Mirel devem também ser baixos, embora uma MSDS não esteja disponível.

O pó de cana-de-açúcar pode causar irritação respiratória. O LD-50 para cana-de-açúcar em ratos é de 29,700 mg/kg, que significa uma dose letal para 50 por cento dos ratos aos quais foram ministrados 29.7g de cana-de-açúcar por quilo de rato.<sup>[66]</sup>

Alguns aldeídos aromáticos, *ketones*, quininos, complexos de metal e sais podem ativar a fotodegradação em plásticos. No entanto, deve-se ter cuidado, uma vez que alguns deles podem também contribuir para a toxicidade do produto final. Ditiocarbamates, por exemplo, irritam a pele e, a longo prazo, são responsáveis por função anormal da tireóide. Eles são considerados como um provável carcinógeno. Há suspeita de que o antracene cause ruptura endócrina, e que seja um tóxico gastrointestinal e tóxico para a pele. Sensibilizantes de baixo peso molecular podem ser liberados dos plásticos por meio de difusão e esse fato, portanto, não permitiria seu uso em aplicações destinadas a embalagem de alimentos. *Pyrene*, que pode ser utilizada como um sensibilizador em plásticos degradáveis, pode causar problemas de saúde.

Os riscos totais dos plásticos UV-degradáveis são mínimos devido à sua base de LDPE e ao aditivo UV benigno. Plásticos oxodegradáveis podem causar alguns riscos para a saúde devido ao uso de complexos de metal transicional e sais. Os aditivos oxodegradáveis são tipicamente baseados em cobalto iônico (II). Co (II) e seus compostos podem causar efeitos adversos em humanos e no meio ambiente. É classificado como um possível carcinógeno, e é muito tóxico para organismos marinhos.

## Plano de Ensaio de Biodegradação

### *Métodos de Ensaio*

Os materiais degradáveis foram testados quanto a biodegradação, utilizando-se cinco métodos:

1. Seguindo os padrões da norma ASTM D6400, monitorando todos os tipos de plásticos degradáveis, incluindo oxodegradáveis, biodegradáveis e compostáveis para biodegradação, medindo-se a evolução de CO<sub>2</sub> durante 45 dias.

Foi testado também o solo de composto quanto a metais pesados e fitotoxicidade.

2. Permitindo a biodegradação de materiais plásticos compostáveis e degradáveis, e de lixo alimentar na Instalação Municipal de Compostagem da Cidade de Chico.

3. Permitindo a biodegradação de materiais de plástico compostáveis com certificação BPI e de lixo alimentar, utilizando compostagem aeróbica *in-vessel* em um local de compostagem comercial em Vacaville.\*

4. Permitindo a biodegradação de materiais de plástico compostáveis com certificação BPI e esterco, utilizando composto aeróbico *in-vessel* na fazenda da universidade.\*

5. Permitindo a biodegradação de materiais de plástico compostáveis com certificação BPI e de lixo sólido alimentar, utilizando composto aeróbico *in-vessel* em um local de compostagem comercial no município de Mariposa, CA.\*

*\*Nota: materiais degradáveis não serão compostados com a utilização de métodos de composto in vessel, devido à potencial contaminação do composto por meio de plásticos residuais não degradados.*

A compostagem é um processo bem aceito de biodegradar materiais orgânicos. O composto pode ser produzido com três técnicas, a saber, *aerated static pile* (sistema de leiras estáticas aeradas), *turned windrow* (sistemas de leiras revolvidas) ou *in-vessel container* (sistemas fechados ou reatores biológicos).

1. *Windrows* são pilhas longas de composto de até dois metros de altura. *Static piles* ou *windrows* não são revolvidas ou mexidas até que a compostagem esteja completa.

2. *Windrows* revolvidas são aeradas por meio de mistura mecânica periódica com uma grande veruma.

3. Compostagem *in-vessel* coloca o material em um tanque, dentro do qual o material de composto é aerado e misturado, revolvendo-se ou mexendo o mesmo. A compostagem em um *vessel* (recipiente) é muito mais rápida do que por meio dos métodos *windrow* tradicionais.<sup>[68]</sup>

O primeiro ambiente de ensaio foi um laboratório controlado. O ambiente cuidadosamente monitorado permitiu a mensuração da taxa de degradação dos materiais compostáveis, bem como o controle de importantes condições laboratoriais, como a temperatura do composto, umidade e pH. O objetivo do experimento laboratorial foi comparar as taxas de degradação de diversos materiais compostáveis com conhecidos materiais compostáveis padrão, bem como avaliar a toxicidade dos produtos em degradação dos plásticos compostáveis. O experimento utilizou os protocolos laboratoriais ASTM D5338, embora os materiais que forem utilizados com sucesso não serão certificados como materiais que atendem a norma ASTM D5338, uma vez que o laboratório não possui certificação ASTM. A norma ASTM D6400 utiliza os métodos experimentais especificados na norma ASTM D5338, mas aumenta o tempo de teste de 45 para 180 dias, e a porcentagem da conversão de carbono aceitável de 60 para 90 por cento. Nós usamos os padrões da norma ASTM D5338 devido ao tempo limitado do estudo. São necessários trabalhos de pesquisa futura, a fim de testar os plásticos biodegradáveis, compostáveis e degradáveis, sob os padrões mais longos da norma ASTM D6400.

A biodegradação pode ser mensurada em nível químico por meio de monitoramento da conversão do amido nos plásticos em dióxido de carbono. Os materiais plásticos compostáveis são expostos a composto maduro a uma temperatura constante e nível de umidade durante um período de 45 dias. O composto maduro de 18 meses é usado para assegurar que a degradação se deve à conversão do plástico compostável e não à degradação de orgânicos no solo. Os inóculos, definidos como material de composto que faz parte do solo e do lixo verde, foram peneirados

com uma peneira de menos de 10 mm para remover as partes grandes. O teste é uma simulação otimizada de compostagem aeróbica intensa na qual a biodegradabilidade das amostras é determinada sob condições de umidade.

O estudo de caso de uma semana na CSU, Chico descartou lixo alimentar e produtos compostáveis na fazenda da universidade. Os materiais foram compostados por meio de método aeróbico *in vessel*. A qualidade do composto foi monitorada em relação à temperatura, pH, umidade e patógenos.

Um outro estudo de caso foi realizado na Usina de Composto de Mariposa, que processa lixo sólido municipal (MSW) para o município de Mariposa, incluindo o Yosemite National Park. Seu sistema *in-vessel* é tecnologia altamente desenvolvida, utilizando um processo *in-vessel* da Nova Zelândia, chamado de Hot Rot Composting Systems.<sup>[69]</sup> O sistema *in-vessel* fornece oxigênio suficiente para degradação aeróbica, enquanto mantém uma temperatura constante de mais de 55° C por três dias, para obter sanitização e controle de odor. A qualidade do composto foi monitorada em relação à temperatura, Ph, umidade, e patógenos.

A digestão anaeróbica foi estudada por UC Davis e Dr. Zhang. O ensaio marinho foi estudado de acordo com as normas ASTM. Os estudos de contaminação pesquisarão os efeitos de plásticos degradáveis no ciclo de reciclagem.

### ***Materials***

Todos os materiais plásticos estavam disponíveis comercialmente compostáveis, biodegradáveis, UV-degradáveis e oxodegradáveis, fabricados em ácido polilático (PLA), amido de milho, copoliésteres, PHA, cana-de-açúcar, e polietileno de baixa densidade (LDPE). Veja a Tabela 4 para uma descrição completa dos materiais de ensaio.

O filtro de papel celulose (filtro Cellupure) da FilterQueen™ e o papel Kraft foram usados como materiais de controle positivo. Uma chapa de plástico de polietileno (Clingwrap) da Glad foi usado como controle negativo, conforme exigido na norma ASTM. Os materiais de teste foram cortados em pedaços de aproximadamente 25 mm por 25 mm.

## Ensaio Laboratoriais

A biodegradação dos materiais compostáveis foi testada em um ambiente experimental controlado. O experimento laboratorial estabelecido foi baseado em procedimentos descritos na norma ASTM D5338. Os gases foram medidos com detectores permitidos pela norma ASTM.

### *Procedimentos de Ensaio*

As amostras foram preparadas adicionando-se 100 g da amostra degradável cortada, a 600 g de composto de solo maduro em um frasco de vidro, vedado, de 3.8 litros. Os materiais de amostra ocuparam 1.5 litros do recipiente e deixaram 2.3 litros de volume aberto para ser ocupado pelo gás. A ASTM D5338 especifica que um máximo de 75 por cento do recipiente pode ser preenchido com amostra de ensaio e composto.

As amostras foram colocadas em um forno mantido a 58° C por 45 dias. A temperatura ambiente foi mantida entre 22° C e 27° C durante o experimento. A parte superior do frasco de vidro possuía uma vedação de borracha. As tampas dos frascos de vidro foram modificadas para adicionar dois tampões com tubos de 5 mm para umedecer o suprimento de ar e para a retirada de gás.

O composto maduro, com idade de no mínimo 18 meses, tinha um pH de 8.7, conteúdo de cinzas de 35 por cento, e taxa de carbono/nitrogênio (C/N) de dez. As mensurações de dióxido de carbono e de amônia foram tomadas no composto com um kit de teste Solivita no início do teste. Tais mensurações foram então utilizadas para calcular a taxa de C/N.

Solivita é um teste fácil de usar que mede ambos os níveis de carbono-dióxido (CO<sub>2</sub>) e amônia (NH<sub>3</sub>) no solo e também fornece um valor de Índice de Maturidade. [70] O composto em branco possuía um índice de maturidade global Solivita de sete, com taxa de amônia de cinco. A taxa de composto madura indica composto bem maturado, antigo, com poucas limitações de uso.

O composto em branco foi peneirado com uma peneira de menos de 10 mm. O conteúdo de sólidos secos foi de 95 por cento e o conteúdo de sólidos voláteis foi de 63 por cento. A porcentagem de sólidos voláteis foi calculada tomando-se a diferença entre o peso seco, e o conteúdo de cinzas, e dividindo-a pelo peso seco.

A disposição do experimento é mostrada na Figura 1. O ar da parte inferior foi enviado primeiro para um depurador de CO<sub>2</sub>, da Fisher Scientific, a fim de remover CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, e outros gases do ar. Foi depois enviado para um cilindro de alumínio com água na parte inferior para umedecer o ar. O ar úmido foi então enviado para uma tubagem coletora a fim de ser distribuído entre os 42 frascos de vidro no forno.

A umidade absoluta das amostras foi regularmente monitorada com um analisador de umidade digital Sartorius. Foi adicionada água destilada, conforme necessário, para obter um conteúdo total de umidade de 50 por cento. O conteúdo da umidade foi encontrado secando-se a amostra com calor infravermelho até que a massa fosse imutável. A temperatura do ar no laboratório se manteve entre 22° C e 27° C durante os 45 dias.

Os frascos de vidro foram girados e agitados semanalmente para manter a uniformidade. O excesso de líquido foi anotado no registro diário, e removido por meio de adição de ar.

Os frascos de vidro receberam o ar úmido enquanto o biogás foi retirado com o auxílio de uma bomba de vácuo. Os biogases foram enviados para um banco de 42 válvulas. Cada válvula foi aberta para enviar o biogás de cada frasco para uma tubagem coletora, e depois para um frasco de vidro de amostra de 320 ml, contendo sensor de gás Pasco de CO<sub>2</sub> ou de O<sub>2</sub>. A tubagem coletora de gás e os frascos de vidro de amostra foram purgados com ar do recinto entre cada mensuração. O ciclo de mensuração demorou aproximadamente 30 minutos, com todos os 42 frascos de vidro mensurados a cada 24 horas.

Os sensores de gás utilizam detecção infravermelha (IR) para mensurar a energia absorvida por dióxido de carbono ou moléculas de oxigênio, e então exibem a concentração apropriada. A concentração de dióxido de carbono é expressa em partes por milhão (ppm). O sensor de gás de CO<sub>2</sub> teve um limite de variação entre 0 e 300,000 ppm, com precisão de 100 ppm ou dez por cento do valor para um limite de variação de 0 a 10,000 ppm, o que for maior. Ele

apresentou 20 por cento de valor de precisão para um limite de variação entre 10,000 e 50,000, e qualitativo somente para valores entre 50,000 e 300,000. O sensor de CO<sub>2</sub> foi calibrado tirando-se amostras de ar externo a 400 ppm. O limite de variação da temperatura de operação foi de 20°C a 30°C.

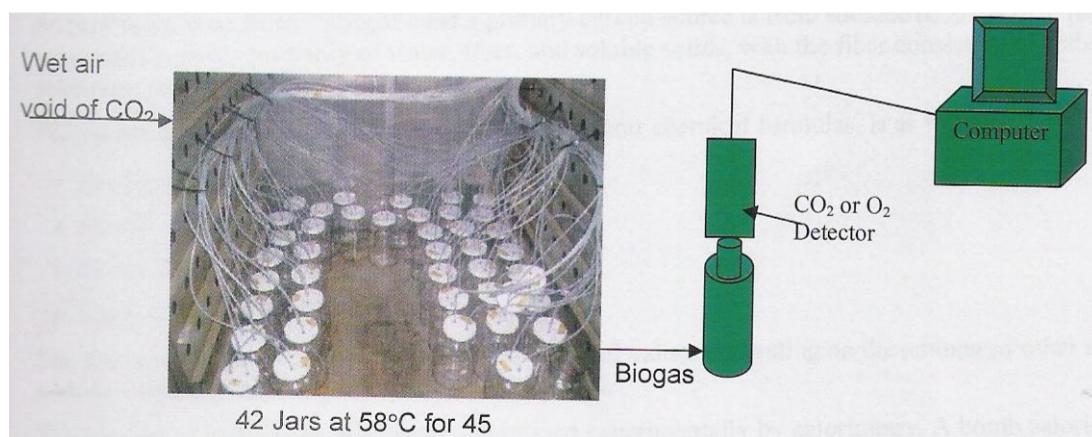
O sensor de oxigênio mediu a porcentagem de oxigênio presente no recipiente. O erro de detecção do sensor foi de mais ou menos um por cento. A concentração mais alta de gás estava no frasco de vidro de compostagem no forno. A concentração no frasco de vidro de compostagem estava fora do limite de variação do detector. O gás do recipiente de compostagem foi retirado com controles de computador e diluído com concentrações de CO<sub>2</sub> do ar do recinto na garrafa de mensuração de 320 ml. As leituras de concentração de gás foram então convertidas de volta para a concentração apropriada do recipiente do composto. Também, concentrações de ppm no recipiente de compostagem foram convertidas em gramas de CO<sub>2</sub>, e depois em gramas de carbono, conforme descrito no Anexo A.

O aparelho sensor testou 42 frascos de vidro em série, e foi controlado por computador, com um sistema de aquisição de dados LabView. O CO<sub>2</sub> foi mensurado com detectores Pasco IR, conforme descrito anteriormente, e a saída da concentração de CO<sub>2</sub> foi salva em um arquivo de computador para cada frasco de vidro de amostra.

A Figura 2 mostra a concentração de CO<sub>2</sub>, versus o tempo para uma amostra de saco de lixo biodegradável após 21 dias. A figura ilustra um período de atraso quando o biogás foi inicialmente puxado do frasco de vidro da amostra, seguido de um aumento constante de concentração de CO<sub>2</sub>, conforme ele continuava a ser puxado através do detector. O declive da curva ppm-tempo é a taxa de dióxido de carbono, acrescentada ao frasco de vidro de detecção durante o experimento. O dióxido de carbono inicial no frasco de vidro da amostra foi removido no início do ensaio. A taxa indica a concentração de dióxido de carbono na amostra, que resultou da biodegradação das amostras de teste.

O conteúdo da umidade do composto foi mantido entre 45 e 55 por cento. O dióxido de carbono foi mensurado a intervalos diários. Os níveis de oxigênio nos recipientes mostraram um limite de variação entre 17 e 21 por cento durante o experimento, o que atendeu as exigências da norma ASTM em mais de seis por cento. Três repetições (repetições experimentais) de cada amostra foram retiradas para o experimento.

**Figura 1. Disposição experimental do laboratório**



**Figura 2. Concentração ppm de CO<sub>2</sub> de saco de lixo BioBag no 21º dia**

**Concentração de Dióxido de Carbono  
Saco de Lixo BioBag**

***Resultados da Concentração de Dióxido de Carbono***

Na medida em que os plásticos compostáveis se degradam é produzido CO<sub>2</sub>. Entretanto, a amostra compostável inicial contém umidade e outros elementos além do carbono. Por exemplo, a celulose, que possui uma fórmula química compressada de C<sub>6</sub>H<sub>10</sub>O<sub>5</sub>, pode ter um conteúdo teórico de carbono máximo de 42 por cento na amostra seca original.

As estruturas químicas do papel Kraft, do amido de milho, do PLA e da cana-de-açúcar são mais complexas. O papel Kraft é feito de polpa Kraft, que é 44 por cento celulose. A fonte de carbono primária do amido de milho é amido de milho amilase nativo (C<sub>5</sub>H<sub>8</sub>O<sub>3</sub>)<sub>n</sub>, onde *n* é o grau de polimerização. A fórmula química comprimida do PLA é (C<sub>3</sub>H<sub>4</sub>O<sub>5</sub>)<sub>n</sub>. Os produtos de cana-de-açúcar, tais como tampas e tigelas, são produzidos de 100 por cento de fibra de cana-de-açúcar.<sup>[71]</sup> A fonte de carbono primária da cana-de-açúcar é de sucrose (C<sub>12</sub>H<sub>22</sub>O<sub>11</sub>)<sub>n</sub>. O bagaço de cana-de-açúcar consiste primariamente em água, fibra e sólidos solúveis, com a fibra consistindo de celulose, pentoses e lignina.<sup>[72]</sup>

A porcentagem de carbono nesses, baseada unicamente em suas fórmulas químicas, é a seguinte:

- Papel Kraft - 44 por cento
- Amido - 55 por cento
- PLA - 30 por cento
- Cana-de-açúcar - 42 por cento

A quantidade de carbono pode ser menor do que os valores teóricos, dependendo da quantidade de outros materiais adicionados para capacitar o processamento em partes plásticas ou sacos.

A quantidade de carbono pode ser diretamente determinada experimentalmente por calorimetria. Um calorímetro de bomba é um dispositivo de volume constante, feito de aço inoxidável, que mede a mudança em temperatura de um volume conhecido de água destilada, enquanto o material combustível é inflamado. O calorímetro da bomba é capaz de suportar a força de reações explosivas. Um Calorímetro Parr, Série 1300, com modelo 1101 de bomba de oxigênio de aço inoxidável, foi usado para mensurar o conteúdo de carbono das amostras. A amostra foi inflamada, e depois o detector Pasco foi usado para mensurar a quantidade de dióxido de carbono produzida. O volume do calorímetro foi de 0.340 litros. A pressão foi de 25 atmosferas. O conteúdo de carbono no recipiente da amostra foi calculado convertendo-se a mensuração ppm para mg/m<sup>3</sup>, usando-se a Equação 3 do Anexo A.



As amostras de plástico foram também mensuradas para conteúdo de umidade. Os resultados de combustão são fornecidos na Tabela 9. O saco de lixo e os recipientes de PLA tiveram aquecimento mais alto de combustão do que o material de celulose. O papel Kraft e o prato de cana-de-açúcar tiveram aquecimento mais baixo de combustão do que o material de celulose. As amostras de celulose, papel Kraft, e cana-de-açúcar apresentaram aproximadamente sete por cento de conteúdo de umidade; o saco de lixo e as amostras de PLA apresentaram um por cento, ou menos, de conteúdo de umidade. O conteúdo de umidade é a média das três mensurações.

**Tabela 9. Conteúdo de carbono e porcentagem de umidade para amostras compostáveis**

Material	Calorimetria da Bomba % do Conteúdo de Carbono	Umidade %
Celulose	16.35	6.09
Papel Kraft	16.53	7.19
Saco de lixo BioBag à base de amido de milho	21.94	1.03
PLA	17.01	0.37
Prato de cana-de-açúcar	15.11	6.74
Saco Mirel	16.28	3.24
Saco Ecoflex	17.99	2.48
Saco oxodegradável	21.29	0.30

### **Resultados da Biodegradação**

Usando a Equação 5 do Anexo A, a taxa de biodegradação foi determinada da quantidade de CO<sub>2</sub> mensurada durante os 45 dias do experimento, e da quantidade de carbono inicial presente na amostra. As fotos do experimento de degradação são fornecidas no Anexo b. O CO<sub>2</sub> foi mensurado conforme descrito anteriormente.

A conversão dos materiais orgânicos em CO<sub>2</sub>, em cada um dos oito materiais, foi representada por gráficos diários da porcentagem de conversão total durante o período de 45 dias. Ver Figuras 3 a 12. Os resultados representam uma média de três amostras por material. A Figura 3 ilustra a degradação somente do material composto. Isto está bem dentro do erro de mensuração do experimento, e é insignificante. O limite de detecção do detector PASCO é de dez por cento do valor ppm máximo de 7000 ppm. O limite de detecção de 700 ppm representa um erro de experimento de mais ou menos 0.04 por cento, o que é razoavelmente baixo para o experimento.

As concentrações de CO<sub>2</sub> foram mensuradas para quatro materiais de controle e seis amostras de plástico degradável. A quantidade de carbono resultante da concentração de CO<sub>2</sub> foi calculada para cada dia. Após 45 dias, a quantidade total de conversão de biodegradação pode ser encontrada adicionando-se resultados diários individuais. Usando tais quantidades, a porcentagem de biodegradação total para todo o ensaio foi calculada e os resultados para cada uma das dez amostras é mostrado na Tabela 10. O composto somente, e o polietileno (controle negativo), produziram muito pouco CO<sub>2</sub>. Isso resultou em menos de dois por cento de conversão do polietileno em carbono, o que pode ser considerado como erro experimental. A taxa de degradação do composto e das amostras de polietileno foi de aproximadamente 0.1 mg/dia.

A celulose e o papel Kraft representaram controles positivos para o experimento. A celulose degradou 72 por cento durante o período de 45 dias do experimento, e o papel Kraft degradou 62 por cento. A ASTM D5338 exige no mínimo 70 por cento de degradação da celulose. As amostras de papel Kraft tiveram porcentagens de conversão de degradação, e taxas de degradação comparáveis a amostras do saco Mirel, dos canudos de PLA, do prato de cana-de-açúcar, BioBag, e dos sacos Ecoflex. O saco oxodegradável teve degradação insignificante, e foi similar ao material de controle LDPE.

**Tabela 10. Taxas de degradação para amostras compostáveis**

<b>Material</b>	<b>% de Conversão de Biodegradação</b>	<b>Taxa de Degradação g/dia</b>
Controle positivo celulose	71.99	0.016
Controle positivo de papel Kraft	61.91	0.014
Saco Mirel	64.03	0.014
Canudos de PLA	61.22	0.014
Prato de cana-de-açúcar	61.12	0.014
Saco de lixo BioBag à base de amido de milho	60.47	0.013
Saco Ecoflex	60.14	0.013
Controle de composto em branco	1.69	0.000
Controle negativo de polietileno	1.70	0.000
Saco oxodegradável	2.19	0.000

**Figura 3. Porcentagem de conversão de carbono somente para controle de composto**

**Biodegradação de Composto em Branco**

**Figura 4. Porcentagem de conversão de carbono para controle de celulose**

**Biodegradação de Celulose**

**Figura 5. Porcentagem de conversão de carbono para controle de papel Kraft**

**Biodegradação de Papel Kraft**

**Figura 6. Porcentagem de conversão de carbono para controle negativo de polietileno**

**Degradação de saco em LDPE**

**Figura 7. Porcentagem de conversão de carbono para saco de lixo BioBag  
à base de amido de milho**

**Biodegradação Biobag**

**Figura 8. Porcentagem de conversão de carbono para canudos de PLA**

**Biodegradação de Canudos de PLA**

**Figura 9. Porcentagem de conversão de carbono para prato de cana-de-açúcar**

**Biodegradação de tampa em cana-de-açúcar**

**Figura 10. Porcentagem de conversão de carbono para saco Mirel**

**Biodegradação de saco em PHA**

**Figura 11. Porcentagem de conversão de carbono para saco Ecoflex**

**Biodegradação do saco Ecoflex**

**Figura 12. Porcentagem de conversão de carbono para saco oxodegradável**

### **Biodegradação de saco oxodegradável**

#### ***Ensaio de Fitotoxicidade***

Os materiais compostáveis não devem liberar materiais tóxicos no solo do composto durante e após a degradação. O solo do composto pode ser testado a fim de avaliar a fitotoxicidade, que indica um ambiente venenoso para as plantas. A germinação de tomateiros novos no solo do composto foi avaliada após dez dias. O teste de fitotoxicidade foi baseado na norma ISO 11269. As sementes de tomate da Vaughan's Seed Company, são uma variedade de 2006 chamadas de "Tiny Tim". Essa variedade é utilizada em aulas de biologia no campus e é conhecida por crescer rapidamente e ser robusta. Dez foram plantados em pequenos copos de bebida (280 ml), preenchidos com aproximadamente 50 gramas de composto de cada uma das amostras de ensaio.

Os recipientes de amostra foram colocados em uma estufa com luz ambiente e regados freqüentemente com água de torneira. A estufa era morna e úmida com temperatura de 25°C e umidade relativa de 80 por cento. Após dez dias na estufa, o número e o comprimento das novas plantas foi registrado em cada amostra. A falta de plantas novas nascendo indicaria fitotoxicidade. A porcentagem de sementes que germinaram, e o comprimento médio das mesmas, estão indicados na Tabela 11. Dez sementes foram colocadas em cada recipiente. O índice de germinação é determinado tomando-se o produto da germinação por cento, e o comprimento médio, e dividindo-se por 100. Todas as amostras possuíam crescimento de plantas novas de tomate, e passaram no teste de fitotoxicidade. Resultados similares foram obtidos com o composto de cana-de-açúcar, degradado usando-se sementes de pepino e de agrião a 25°C, 80 por cento de umidade relativa, e luz ambiente durante dez dias na estufa. As plantas novas de pepino exibiram porcentagem de germinação e crescimento similares a dos tomateiros novos, mas eram mais altas. As plantas novas de agrião também apresentaram porcentagens de germinação similares às dos tomateiros novos, mas apresentaram uma altura bastante inferior. Os tomateiros novos apresentaram uma altura ótima, e foram adotados como fontes de semente padrão para o experimento.

**Tabela 11. Fitotoxicidade do solo de composto**

Material	Porcentagem Média de Germinação	Comprimento Médio em mm após 10 dias	Índice Médio de Germinação	pH Médio
Controle de composto	46.67	24.33	11.35	8.5
Controle de celulose	43.33	22.67	9.82	8.8
Controle de celulose Avicell	83.33	18.33	15.27	8.7
Controle de papel Kraft	66.67	26.67	17.78	8.4
Controle negativo de polietileno	70	25	17.50	8.63
Recipiente de PLA	70	20	14	8.5
Tampa de cana-de-açúcar	70	14	9.80	8.77
Saco BioBag à base de amido de milho	60	32.33	19.40	8.63
Saco Mirel	63.33	16	10.13	8.63
Saco Ecoflex	56.67	18.33	10.39	8.6
Saco oxodegradável	73.33	18.33	13.44	8.8

### **Ensaio de Metal Pesado**

Os materiais degradados não devem deixar qualquer metal pesado no solo do composto após a degradação. O solo do composto de cada uma das amostras degradadas foi testado para chumbo (Pb) e cádmio (Cd). Adicionalmente, o solo do composto do controle de composto em branco, e as amostras de plástico oxodegradáveis foram testadas para cobalto (Co) residual. O limite aceitável é de 30 mg/kg para Pb e de 0.3 mg/kg para Cd. Nos Estados Unidos não há limites para Co. O solo do composto para cada amostra foi colocado em solução, e o metal pesado no solo do composto foi mensurado por meio de espectrometria de absorção de flama atômica, e lâmpadas de duas polegadas de diâmetro Fisherbrand [73] de elemento único de catodo oco com elementos para chumbo e cádmio e cobalto.

A absorção de chumbo e cádmio foi mensurada a 283.3 nm e 228.8 nm, respectivamente. A correção de *background* foi mensurada a 281.2 nm para Pb e a 226.5 nm para Cd. Os limites de detecção são de 0.02 ppm Pb, 0.005 ppm Cd, e 0.02 ppm Co na solução analítica. Para uma amostra de 1 grama, os limites de detecção são 0.2 ppm Pb, 0.2 ppm Co, e 0.05 ppm Cd. As amostras de solo que foram usadas durante os testes de fitotoxicidade foram também usadas para mensurar níveis de chumbo e cádmio. Aproximadamente 10 gramas de solo de composto de cada amostra foram secas durante 24 horas a 105 °C. A perda média de umidade foi de aproximadamente 30 por cento. Cerca de três gramas de cada amostra seca foi pesada em um bécher de 150 mL para o qual 50 mL de 8 M HNO<sub>3</sub> foram acrescentados. As amostras foram aquecidas durante 4 horas a 85 °C, com agitações ocasionais. Após quatro horas, 50 mL de água di-ionizada foram acrescentados a cada amostra, seguida de filtração a vácuo utilizando-se um filtro de vidro Whatman GF/A com um por cento de (v/v) HNO<sub>3</sub>. O filtrado foi transferido quantitativamente para um frasco volumétrico de 250-mL e preenchido até a marca com 1 por cento de (v/v) HNO<sub>3</sub>. Todas as amostras resultantes possuíam aparência laranja-avermelhada relativamente intensa.



A preparação da amostra incluiu adicionar uma amostra de 0.8239 g de  $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$  a um frasco volumétrico de 500-mL, dissolvido e diluído até a marca, com 1 por cento (v/v) de  $\text{HNO}_3$  rendendo uma solução de 1099.5 ppm  $\text{Pb}^{2+}$ . Várias soluções padrão variando de 0.220 a 1.10 ppm  $\text{Pb}^{2+}$  em um por cento (v/v) de  $\text{HNO}_3$  foram preparadas junto com uma solução de 1 M de  $\text{HNO}_3$ . Soluções padrão foram preparadas dissolvendo-se 0.2460g Cd em aproximadamente 3 mL de 6M HCl, e aproximadamente 2 mL de 8M  $\text{HNO}_3$  em um frasco volumétrico de 250 mL, diluído até a marca com 1 por cento HCl (v/v) de rendimento em solução de 984 ppm Cd. Várias soluções padrão, incluindo uma em branco somente de composto maduro, foram preparadas de 0.0984 ppm a 9.840 ppm Cd em um por cento de HCl.

As soluções padrão e oito soluções de amostra foram analisadas utilizando-se Espectrofotômetro de Absorção Atômica ThermoElectron S Series Flame, usando uma chama de ar-acetileno, e uma lâmpada de catodo oco de Pb detectando a 283.3 nm, uma lâmpada de catodo oco de Co, e lâmpada de catodo oco de Cd. As soluções de amostra deram absorbância no ponto padrão mais baixo empregado, ou muito próximo a esse ponto, que foi apenas acima do limite de detecção do instrumento. Usando 0.022 ppm  $\text{Pb}^{2+}$  enquanto o limite de detecção leva a um limite superior de 20 ppm  $\text{Pb}^{2+}$  nas amostras de solo originais. O valor de 20 ppm equaciona a 0.02 mg/kg para Pb. As concentrações de Cd foram inferiores a 1ppm, o que equaciona a 0.001 mg/kg Cd. Todas as amostras de solo dos materiais compostáveis levaram a concentrações muito mais baixas do que o limite de 30 mg/kg Pb e concentrações de Cd inferiores ao limite de 17 mg/kg Cd. De fato, os valores mensurados para Pb e Cd estavam nos limites de detecção mais baixos dos detectores Pb e Cd. Similarmente, as concentrações de cobalto foram muito inferiores, tanto nas amostras de controle, como nas oxodegradáveis.

## Ensaio Marinho

### *Background*

A poluição marinha é uma preocupação mundial. A poluição ambiental marinha é regulamentada pelo tratado de MARPOL. O tratado proíbe que seja descartado no oceano qualquer lixo plástico de navios ou plataformas ao largo do oceano.<sup>[74]</sup> Plásticos à base de petróleo podem causar efeitos ambientais, pois permanecem boiando na água por um longo período antes de desintegrar. O Poli Ester Uretano teve uma perda de peso significativa na água do mar no período de 12 meses, enquanto o poli éter uretano não experimentou nenhuma perda de peso em 12 meses.<sup>[75]</sup>

Plásticos de polietileno tipicamente flutuam na água do oceano, e podem demorar 100 anos para desintegrar completamente. O polietileno não degradou em ambiente marinho a uma temperatura de 30°C após 12 semanas.<sup>[76]</sup> O polietileno flutuante de baixa densidade, com UV-degradante, deteriorou mais lentamente em ambiente marinho do que em terra.<sup>[77]</sup> Conectores de anel de plástico LDPE fotodegradável podem degradar em ambientes marinhos e terrestres, com uma perda de 50 por cento nas propriedades, dentro de um período de 12 meses.<sup>[78],[79]</sup>

O plástico biodegradável se degradará muito mais rapidamente do que o polietileno, por causa da sua habilidade de absorver água e afundar na água do oceano. Entretanto, somente PHA, PHB, e poly-ε caprolactone demonstraram biodegradar no ambiente marinho.<sup>[80]</sup> O uso de plásticos biodegradáveis tem sido estudado para biodegradação em ambientes marinhos.<sup>[81]</sup> A biodegradação de plásticos biodegradáveis é essencial para os plásticos a serem utilizados em redes de pesca e outras aplicações aquáticas. Polihidroxialcanoato (PHA), polihidroxivalerato (PHV), e polihidroxibutirato (PHB) foram estudados extensivamente quanto a biodegradação em ambientes marinhos. O PHB biodegradou na água do mar a uma taxa de 0.6 µg/semana a 25°C. Entretanto, o PLA não se degradou na água do mar a mesma temperatura.<sup>[82]</sup> O PLA também não se biodegradou em um ambiente de líquido aeróbico. O PHB biodegradou rapidamente em três semanas, embora o Mirel se degradasse mais lentamente.<sup>[83]</sup>

### *Procedimentos de Ensaio*

Foram conduzidos dois testes marinhos. Os materiais de amostra para o primeiro teste marinho incluíram: papel Kraft e controles de polietileno de baixa densidade, anéis de seis pacotes de UV-degradável, sacos de lixo em plástico oxodegradável, ecologicamente seguro e não prejudicial ao meio ambiente, canudos em PLA, sacos de lixo de amido de milho, sacos Mirel, sacos Ecoflex, e tampas em cana-de-açúcar Stalk Market.

As amostras foram testadas quanto a exposição marinha por meio de procedimentos baseados nas normas ASTM D6691 e ASTM D7081. A norma ASTM D6691 é um método de ensaio para determinar biodegradação aeróbica de materiais plásticos no ambiente marinho, por união microbiana definida. Um material de amostra de ensaio demonstra desintegração satisfatória se após 12 semanas, ao menos 70 por cento do material desintegrar. A norma ASTM D7081 é uma especificação padrão para plásticos biodegradáveis não flutuantes em ambientes marinhos. Ambos os padrões requerem também que a quantidade de CO<sub>2</sub>, gerada durante o processo de degradação, seja mensurada. Uma amostra de ensaio demonstra biodegradação satisfatória se após 180 dias 30 por cento ou mais das amostras estiver convertida em dióxido de carbono. A amostragem e a preparação de espécime são idênticas em ambos os padrões.

As amostras degradáveis foram preparadas de acordo com a norma ASTM D7081. Uma amostra pequena - 0.030g - de cada material foi colocada em um frasco de vidro com 100 ml de água de oceano. A água de oceano foi colhida em julho na praia Big Sur, na Califórnia, e mantida a 5°C por 30 dias, até o início do ensaio. As amostras foram colocadas em um forno mantido a 30°C. A massa do material foi registrada após 30 e 60 dias. Após 30 dias, as amostras foram removidas do frasco de vidro e deixadas para secar durante a noite. Após pesagem, as amostras foram colocadas em frascos de vidro com água nova do oceano, e então colocadas no forno novamente.

Um segundo ensaio foi conduzido usando-se amostras maiores (3 g) que afundam. Isso fez com que fosse gerado mais dióxido de carbono do que com a amostra de 0.030 g de tamanho especificado na norma ASTM D7081. A quantidade de dióxido de carbono produzida durante o segundo experimento foi mensurada com o detector PASCO. As amostras foram mantidas em um forno e mantidas a 30°C durante três semanas. As amostras incluíam controle de papel Kraft, saco

Mirel, saco Ecoflex, BioBag, cana-de-açúcar, e PLA. O dióxido de carbono foi mensurado com equipamento controlado por computador do ensaio de composto da norma ASTM D5338. Ar seco, sem CO<sub>2</sub>, foi acrescentado a frascos de vidro de 3.8 L contendo 3 g de cada amostra, juntamente com 300 ml de água de oceano e 10 ml de solo oceânico. O software LabView controlou a abertura das válvulas, e registrou a quantidade de CO<sub>2</sub>, conforme mensurado com os detectores PASCO.

## **Resultados**

Para o primeiro teste, após 30 dias em água oceânica, a amostra Mirel teve 36 por cento de desintegração. Não houve desintegração dos sacos de lixo de plástico oxodegradável e de plástico UV-degradável, controle LDPE, controle de papel Kraft, canudos de PLA, tampas de cana-de-açúcar, sacos de lixo à base de amido de milho, ou saco Ecoflex.

Similarmente, após 60 dias na água do oceano, a amostra Mirel apresentou 60 por cento de desintegração. As outras amostras ainda não haviam experimentado qualquer desintegração. Não houve desintegração dos sacos de lixo oxodegradáveis e UV-degradáveis, controle LDPE, controle de papel Kraft, tampas em PLA, tampas em cana-de-açúcar, sacos de lixo à base de amido de milho, ou saco Ecoflex. Os materiais que afundaram na água marinha foram o controle de papel Kraft, os canudos de PLA, o saco Mirel, o saco Ecoflex, e o saco de amido de milho. Os materiais que flutuaram incluíram o controle LDPE, a tampa de cana-de-açúcar, o saco oxodegradável, o saco UV-degradável, e os anéis de refrigerante UV-degradáveis. Os seis pacotes de amostras de anéis de polietileno UV-degradável não experimentaram perda de peso em 14 dias, mas se tornaram mais quebradiços. Três anéis de plástico foram colocados em água oceânica e expostos à luz do sol e temperaturas entre 15°C e 35°C. Da mesma forma, três anéis de plástico foram colocados em uma caixa de madeira sem água do mar, e também expostos à luz solar e temperaturas entre 15°C e 35°C. Nenhuma das seis amostras experimentou qualquer perda de peso após 14 dias. Várias das amostras puderam ser separadas e fragmentadas. Isso ocorreu, mais provavelmente, por causa da divisão da cadeia de polímero como consequência da exposição à luz ultravioleta. É necessário fazer pesquisas adicionais para entender melhor a fragmentação de plásticos UV-degradáveis em ambientes de água marinha, e em ambientes terrestres.

Os resultados do segundo ensaio marinho são similares à primeira bateria de testes nos quais nenhuma das amostras detectou quantidades de CO<sub>2</sub>, que não as de saco PHA Mirel e tampa de cana-de-açúcar. Após 21 dias, a quantidade de degradação de carbono foi de seis por cento para o saco Mirel e de dois por cento para a tampa de cana-de-açúcar. Os outros plásticos compostáveis, como por exemplo, o PLA, BioBag, Ecoflex, e papel Kraft apresentaram menos de um por cento de biodegradação, o que está dentro dos limites de erro experimental.

A quantidade de biodegradação foi inferior no segundo experimento devido a vários fatores, incluindo: massa de amostra original insuficiente, raio impróprio de massa de amostra para volume de água de oceano, e outras condições experimentais. Experimentos futuros devem ser modificados para melhorar as técnicas de mensuração. É necessário realizar pesquisas adicionais, para que se compreenda melhor a biodegradação de polímeros compostáveis e biodegradáveis no ambiente marinho.

## Digestão Anaeróbica

Plásticos degradáveis podem também se fragmentar em condições anaeróbicas. A digestão anaeróbica ocorre quando materiais orgânicos são fragmentados por bactéria na ausência de oxigênio.<sup>[84]</sup> Digestores anaeróbicos são comumente usados para tratamento de esgoto, ou para gerenciar lixo animal em fazendas. Materiais orgânicos que podem ser digeridos anaerobicamente incluem papel descartado, cortes de grama, restos de alimentos, esgoto e lixo animal.

Muitos fatores afetam a biodegradabilidade de polímeros, incluindo pH, tipo de bactérias, temperatura, peso molecular, ligações químicas, e acesso do material ao sistema enzimático.<sup>[85]</sup> Vários tipos de plásticos biodegradáveis comerciais demonstraram degradar sob condições aeróbicas e anaeróbicas. Plásticos biodegradáveis derivados de polímeros naturais, tais como amido ou celulose, contêm componentes recalcitrantes que podem inibir a degradação microbiana. Os resultados mostraram que o comportamento da degradação de plásticos biodegradáveis comerciais é diferente daquele dos polímeros puros, devido aos aditivos utilizados para melhorar o desempenho do produto final.<sup>[86]</sup> A digestão anaeróbica termofílica da fração orgânica do lixo sólido municipal foi aplicada com sucesso em digestores na escala laboratorial<sup>[87]</sup> e na anaeróbica de escala total.<sup>[88]</sup>

### **Materiais**

Os polímeros degradáveis foram avaliados sob condições anaeróbicas, e caracterizados com métodos estabelecidos para a digestão de lixo alimentar.<sup>[89]</sup> Os materiais degradáveis incluíram copo e canudo em PLA, prato de cana-de-açúcar, BioBag à base de amido de milho, saco Mirel, saco Ecoflex, saco oxodegradável, saco UV-degradável, e papel Kraft para controle. O BioBag é produzido com uma resina Novamont, derivada de amido de milho, em combinação com poliésteres alifáticos totalmente biodegradáveis, poliésteres alifáticos/aromáticos, ou em particular, ácido polilático. O Ecoflex é um copoliéster alifático-aromático baseado em 1,4-butanediol e ácidos dicarboxílicos, ácido adípico e ácido tereftálico. A produção de biogás a partir desses sete substratos, foi comparada com aquela produzida a partir do papel Kraft. Foi acrescentado lixo alimentar para fornecer uma fonte para os elementos macro e micro necessários para o crescimento do microorganismo.

### **Procedimentos de Ensaio**

As amostras degradáveis - de 1 grama cada - foram combinadas com lixo alimentar em garrafas de um litro. Cada garrafa de reator foi purgada com gás hélio durante cinco minutos para assegurar condições anaeróbicas. Todos os experimentos foram realizados em duplicata sob condições termofílicas a 50°C. O pH inicial de todos os materiais foi de 7.4. O total dos sólidos e sólidos voláteis da borra e do lixo alimentar foram mensurados de acordo com a norma ASTM D5630 e com o método Amirel por 43 dias. A pressão foi mensurada diariamente em cada *headspace* dos reatores do lote, utilizando um sistema de gauge de pressão WAL-BMP. O biogás no *headspace* dos reatores foi liberado sob a água para prevenir qualquer troca de gás entre o reator e o ar. Os volumes de biogás de cada reator foram determinados pela seguinte equação:

$$V_{\text{Biogás}} = \frac{PV_{\text{head}}C}{R.T} \quad \text{Equação 1}$$

Onde  $V_{\text{Biogás}}$  = volume diário de biogás (L),  
 $P$  = diferença de pressão absoluta (mbar),  
 $V_{\text{head}}$  = volume do *headspace* (L),  
 $C$  = volume molar (22.41 L mol<sup>-1</sup>),  
 $R$  = constante de gás universal (83.14 L.mbar.K<sup>-1</sup>.mol<sup>-1</sup>),  
 $T$  = temperatura absoluta (K).

As quantidades de metano e de dióxido de carbono produzidas em cada reator foram mensuradas periodicamente, utilizando-se cromatografia a gás, HP 5890 A, com 1.8 × 0.32 mm *Alltech carbospher column*. O hélio foi o gás transportador a uma taxa de vazão de 60 ml/min. As temperaturas do forno e do detector de condutividade térmica foram de 100° e 120°, respectivamente. O gás escoou para dentro de uma coluna preenchida com hélio na qual um

detector de condutividade termal mensurou a quantidade de metano e de dióxido de carbono na amostra. Um padrão de gás com 60 por cento de metano e dióxido de carbono foi utilizado para calibrar os reatores.

### **Resultados**

As porcentagens de sólidos totais e voláteis (VS), para cada um dos substratos e de borra, são mostrados na Tabela 12. O saco de plástico oxobiodegradável não demonstrou qualquer perda de matéria orgânica após ter sido aquecido a 105° C durante 24 horas. Os sólidos totais do saco de PHA Mirel apresentaram 100 por cento de VS.

**Tabela 12. Características dos substratos e da borra**

<b>Tipo de Material</b>	<b>Total de Sólidos, %</b>	<b>Sólidos Voláteis/ Total de Sólidos, %</b>	<b>Biodegradação % C</b>
Controle de lixo alimentar	19.17	92.83	Não se aplica
Controle de borra	0.24	47.59	Não se aplica
Controle de papel Kraft	96.64	95.72	6
Canudos de PLA	99.59	94.90	6
Copos de PLA	99.60	99.98	6
Prato de cana-de-açúcar	94.21	99.43	24
Saco de PHA Mirel	99.03	99.99	38
BioBag	93.48	99.58	5
Saco Ecoflex	99.96	90.57	6
Saco oxodegradável	99.99	96.18	0
Saco de plástico claro UV-degradável	97.75	99.91	0

Os digestores começaram com uma carga inicial de 50 por cento de amostra degradável e 50 por cento de lixo alimentar. As Figuras 13 e 14 mostram a produção de biogás acumulada após a carga inicial. Essas figuras demonstram que foi produzido biogás durante os primeiros 15 dias a partir da digestão do lixo alimentar. Após o consumo do lixo alimentar em cada um dos frascos de vidro, o saco de PHA Mirel e as amostras de cana-de-açúcar continuaram a produzir novo biogás, e assim foram biodegradadas no recipiente anaeróbico. As outras amostras (papel Kraft, sacos de PLA, amido de milho, Ecoflex, oxodegradável e UV-degradável) não produziram biogás adicional após 15 dias, indicando que havia ocorrido muito pouca biodegradação. Com exceção do saco Mirel e do saco de cana-de-açúcar, houve pouca diferença entre a produção diária de biogás das amostras e do lixo alimentar.

**Figura 13. Produção cumulativa de biogás de digestão anaeróbica**

**Figura 14. Produção cumulativa de biogás de digestão anaeróbica**

Os rendimentos de biogás, somente das amostras degradáveis, foram calculados como a diferença entre o biogás produzido de reatores tratando uma mistura de lixo alimentar e amostras degradáveis, e daquela tratando somente de lixo alimentar. Os resultados são mostrados na Figura 15.

O biogás dos reatores possui em média 60 por cento de gás metano e 40 por cento de gás dióxido de carbono.<sup>[90]</sup> A porcentagem de biodegradação (BDG) é calculada multiplicando-se cada volume de biogás resultante de amostras (Vol) por 40%, multiplicando-se depois esse resultado pela densidade de dióxido de carbono ( $dCO_2$ ). O produto resultante é então dividido pela quantidade de carbono disponível em cada amostra (C). Ver Equação 2. Os resultados da biodegradação são mostrados na Tabela 10. O saco em PHA Mirel e as amostras de cana-de-açúcar tiveram uma biodegradação de 38 por cento e 24 por cento, respectivamente. Os outros materiais tiveram biodegradação insignificante. O pH final médio variou de 6.33 a 6.87 para todas as amostras.

$$\% BDG = \frac{(Vol \times 40\%) \times dCO_2}{C}$$

**Equação 2**

Onde %BDG é a porcentagem de biodegradação  
Vol é o volume de biogás da amostra  
 $dCO_2$  é a densidade de dióxido de carbono  
C é a quantidade de carbono disponível em cada amostra

**Figura 15. Produção de biogás no 43º dia da digestão anaeróbica**

## Ambientes de Compostagem

Os materiais biodegradáveis e oxodegradáveis foram colocados em quatro ambientes de composto, incluindo *windrow* tradicional, esterco *in-vessel*, lixo alimentar *in-vessel*, e lixo sólido municipal *in-vessel*. Todas as instalações de compostagem são operações comerciais e produzem composto para o público.

### **Instalação de Composto Municipal, Cidade de Chico**

A instalação de composto municipal da cidade de Chico está localizada em um local de 10 acres que produz 500.000 de jardas cúbicas (1 jarda = 0.914 m) de composto a cada ano por meio de composto *windrow* aeróbico. O composto é misturado utilizando-se um revolvedor de *windrow*. A máquina girante se abre para pegar a leira (*windrow*) de aproximadamente oito pés de altura por 13 pés de largura. Os revolvedores passam em meio ao *windrow* vagarosamente, movimentando-se para frente. Um tambor de aço com pás gira o composto rapidamente. Enquanto o girador se move através do *windrow*, é injetado ar fresco (oxigênio) para dentro do composto, pelo conjunto tambor/pá, e são removidos gases de lixo produzidos por bactérias. O oxigênio alimenta a bactéria de compostagem benéfica, e assim torna mais rápido o processo de compostagem eventual. Esse processo é então estendido por dinâmica de *windrow*.<sup>[91]</sup> A usina aceita lixo verde, que inclui aparas de gramado, folhas, madeira, gravetos, ervas daninhas, e poda. O ensaio em usinas de compostagem comerciais permite que plásticos comerciais compostáveis sejam expostos a composto ativo, que possui um alto grau de atividade enzimática e altas temperaturas.

### **Materiais e Procedimentos**

O lixo alimentar e os produtos plásticos do experimento da lanchonete foram colocados no composto com sacos plásticos oxodegradáveis e papel Kraft em 10 de maio de 2006. Foram também enterrados contaminantes, incluindo: copos de papel com *liners* de polietileno, pratos de papel, copos de plástico, garrafas de água de plástico e sacos de lixo de plástico. Porções do lixo coletadas da demonstração de bio-plásticos de uma semana na lanchonete da Chico State University foram enviadas para o local de compostagem municipal. Aproximadamente 1.5 jardas<sup>3</sup> foram enviadas para a instalação de compostagem em um *dirt pad* (tapete de lixo). Durante o experimento, o composto foi revolvido com um revolvedor de *windrow*.

Durante o experimento, o conteúdo de umidade do composto esteve entre 35 e 55 por cento e a temperatura do composto variou de 48°C a 65°C. A temperatura do ar externo esteve entre 35°C e 43°C. Fotografias dos fragmentos plásticos durante este experimento são fornecidas no Anexo C.

Após 120 dias, a pilha de composto foi peneirada para a remoção de detritos. O composto foi testado quanto a porcentagem de umidade, temperatura, pH, maturidade do composto, e porcentagem de sólidos. O índice de maturidade do composto pode ser definido como composto resistente à decomposição adicional e livre de compostos, tais como amônia e ácidos orgânicos, que podem ser tóxicos para o crescimento da planta. A desintegração dos produtos foi monitorada para fragmentos de amostra após 30, 60, 90 e 120 dias de intervalo de teste.

### **Resultados**

Após 90 dias, as colheres, facas e tampas em PLA haviam se desintegrado completamente. Os plásticos compostáveis, incluindo cana-de-açúcar, BioBag, recipientes de PLA, copos de PLA, e pratos de cana-de-açúcar tiveram uma biodegradação notável e foram reduzidos a fragmentos. Os plásticos oxodegradáveis e UV-degradáveis ficaram completamente intactos e não mostraram qualquer sinal de desintegração.

Após 120 dias, garfos, colheres, facas e tampas em PLA, tampas e pratos à base de cana-de-açúcar foram completamente biodegradados, e nenhum fragmento foi encontrado. Pequenos fragmentos de copos de PLA, recipiente de PLA, e sacos de lixo à base de amido de milho eram visíveis. Os pequenos fragmentos de PLA resultaram da forma como o recipiente de PLA e o copo se fragmentaram e foram revolvidas pela máquina de vermicompostagem. Os fragmentos tinham uma área de superfície maior do que os garfos, colheres e canudos de PLA. A área de superfície maior fez os fragmentos do copo e do recipiente de PLA menos densos e suscetíveis a se reunirem na superfície da pilha de composto e não abaixo da superfície. Polímeros biodegradáveis – como o PLA – se degradarão muito pouco quando não estiverem em um ambiente de composto quente.



Aproximadamente 750 copos de PLA, 500 recipientes em *clamshell* e 15 sacos de lixo foram enterrados na instalação de compostagem municipal. Cerca de quatro fragmentos de copo e recipiente foram encontrados. Os quatro fragmentos seriam iguais à massa de um copo para uma taxa de degradação global de PLA de 99.92 por cento.

Os sacos verdes oxodegradáveis Eco-safe foram fragmentadas em pedaços pelo revolvedor de *windrow*, mas não pareceram se degradar. Os sacos de plástico oxo-biodegradáveis eram de tamanho natural, e não pareceram experimentar qualquer degradação. Nem as garrafas de água de plástico, nem os copos para refresco de papel com revestimento em polietileno se degradaram.

### ***Instalação de Composto In-vessel da Fazenda da Universidade***

A fazenda da universidade usa esterco de vaca e palha para criar um composto que é vendido comercialmente. O ambiente da fazenda da universidade representa uma instalação de composto comercial com composto muito ativo à base de esterco, que deveria fornecer um alto grau de atividade enzimática e nutrientes para permitir a degradação dos materiais compostáveis. A Fazenda da Universidade na Universidade Estadual da Califórnia, Chico, produz 250 toneladas de composto de esterco de vacaria e palha de arroz anualmente, usando métodos de *windrow* convencionais. A composição do nutriente, ou NPK, é de 1.2 partes de nitrogênio para 0.5 partes de fósforo, para 1.5 partes de potássio. O conteúdo da matéria orgânica é de aproximadamente 30 por cento e o pH é 8. A contagem de coliformes fecais é 0, a contagem para E.coli é de 0, e a contagem para salmonela é 0. O conteúdo de metais pesados do composto foi negativo para arsênico, chumbo e mercúrio.<sup>[92]</sup>

### **Materiais e Procedimentos**

Foram enterrados no local de composto da fazenda da universidade lixo alimentar e produtos biodegradáveis, incluindo: copos, garfos, colheres, facas, recipientes em *clamshell*, tampas e canudos de PLA, pratos de cana-de-açúcar, e sacos de lixo de amido de milho. Estavam também enterrados contaminantes que incluíam copos de papel com revestimento de polietileno, pratos de papel, copos plásticos, garrafas de água de plástico e sacos de lixo de plástico.

O lixo alimentar, os produtos plásticos e o composto foram colocados no monte do composto. A temperatura e a umidade do composto foram mensuradas e foram registradas a temperatura ambiente e as condições climáticas. Porções do lixo coletado da demonstração de bioplásticos de uma semana na lanchonete da Chico State University foram enviadas ao local de composto da fazenda. Aproximadamente 0.5 jardas<sup>3</sup> foram enviadas para o local da fazenda da universidade e enterradas em 9 de maio de 2006, sob um ambiente de saco *Ag in vessel* sobre um tapete de superfície de concreto. Após 30 dias o *in-vessel* foi removido e o composto foi revolvido em uma operação *windrow* tradicional por 90 dias. O composto foi testado quanto à porcentagem de umidade, pH, maturidade do composto, e sólidos por cento. A desintegração dos produtos foi monitorada após 30, 60, 90 e 120 dias de intervalos de teste.

Durante o experimento, o conteúdo da umidade do composto esteve entre 35 e 55 por cento e a temperatura do composto variou de 48°C a 64°C. A temperatura do ar exterior variou de 35°C a 43°C. Fotos dos fragmentos de plásticos verificados durante este experimento são fornecidas no Anexo D.

### **Resultados**

Após 120 dias, os materiais que degradaram completamente eram similares aos resultados do composto de lixo verde e incluíam garfos, colheres, facas e tampas de PLA, tampas e pratos de cana-de-açúcar. Pequenos fragmentos de copos e recipiente de PLA, e sacos de lixo de amido de milho eram visíveis. Como no local do composto de lixo verde, os pequenos fragmentos de PLA resultaram da maneira como o recipiente e o copo de PLA se fragmentaram e foram revolvidos pela máquina de veruma. Aproximadamente 250 copos de PLA, 160 recipientes em *clamshell*, e seis sacos de lixo foram enterrados no local de composto municipal. Aproximadamente três fragmentos de copo e de recipiente de PLA foram encontrados. Os três fragmentos seriam iguais à massa de meio copo para um total de taxa de degradação de PLA de 99.88 por cento.

## ***Instalação de Composto de Lixo Alimentar In-vessel em Vacaville***

A usina é operada pela Jepson Prairie Organics (JPO), uma subsidiária de propriedade total da Norcal Waste Systems, Incorporated. A instalação processa 80.000 toneladas de sobras de cozinha, restos de pratos, e outros restos de alimentos de restaurantes, hotéis de São Francisco, e de sobras de comida coletadas dos residentes da cidade. Anualmente, a usina de Jepson Prairie transforma o lixo alimentar em 30.000 toneladas de composto orgânico.

### **Materiais e Procedimentos**

O lixo alimentar e os produtos de plástico do experimento da lanchonete foram colocados no composto com sacos plásticos oxodegradáveis e papel Kraft. Aproximadamente 4 jardas<sup>3</sup> foram enviadas para a instalação de composto em um tapete de lixo. Originalmente, as amostras degradáveis foram colocadas na pilha de composto na sua forma nativa. Entretanto, devido à alta quantidade de detritos na pilha de composto, foi difícil identificar amostras biodegradáveis e degradáveis, e o experimento foi interrompido.

Alternativamente, as amostras biodegradáveis e degradáveis foram colocadas em um saco de aniagem juntamente com o lixo sólido municipal (MSW) do local de compostagem e depois enterrado no composto *in-vessel* em 13 de junho de 2006. As amostras degradáveis e compostáveis foram misturadas com outras MSW e colocadas no lixo sob um saco de plástico de 8 milímetros de espessura para a operação de compostagem *in-vessel*. As amostras compostáveis incluíam BioBag à base de amido de milho, saco Mirel, saco Biotuf Ecoflex, saco Husky, tampas de PLA, tampas de cana-de-açúcar, e papel Kraft. Foram também enterrados *shrinkwrap* de polietileno, saco plástico UV-degradável, e saco plástico oxodegradável. Foram também enterrados contaminantes, incluindo: copos de papel com revestimento de polietileno, pratos de papel, copos de papel, garrafas de água de plástico e sacos de lixo de plástico.

Após 30 dias, o *in-vessel* foi removido e o composto foi revolvido em uma operação *windrow* tradicional por mais 30 dias. Ao final de 60 dias, o composto foi peneirado e o composto separado foi colocado em uma pilha estática por 60 a 120 dias. O composto foi revolvido com um revolvidor de *windrow* duas vezes por semana para aerar a pilha de composto. A temperatura e a umidade do composto no saco foram mensuradas e a temperatura ambiente e condições meteorológicas foram registradas.

Após 60 dias, a pilha do composto foi peneirada para remoção dos detritos. Devido ao rompimento parcial dos sacos de aniagem, eles foram removidos após 60 dias e enterrados em um saco plástico perfurado em uma pilha estática. O composto foi testado para porcentagem de umidade, temperatura, pH, maturidade do composto e porcentagem de sólidos. A desintegração dos produtos foi monitorada para fragmentos de amostra após 30, 60, 90 e 180 dias de intervalos de teste.

Durante o experimento, o conteúdo de umidade do composto foi de 30 a 55 por cento e a temperatura do composto variou entre 55°C e 70°C. A temperatura do ar externo variou entre -5°C a 40°C. Fotos dos fragmentos plásticos durante o experimento estão disponíveis no Anexo E.

### **Resultados**

Após 180 dias, os materiais que se degradaram completamente incluíram tampas de PLA, sacos Mirel, sacos Ecoflex, sacos Husky, e sacos de lixo à base de amido de milho. Pequenos fragmentos de tampas de cana-de-açúcar e papel Kraft estavam visíveis. Os fragmentos de cana-de-açúcar e papel Kraft estavam bastante úmidos e desintegrados quando coletados.

O papel Kraft e os fragmentos de cana-de-açúcar não se degradaram completamente, uma vez que não houve agitação mecânica nos sacos plásticos. Se os materiais tivessem sido colocados no solo do composto, teria ocorrido uma degradação maior, devido a melhor interação com o solo do composto. Os sacos de plástico oxobiodegradáveis, os sacos de plástico LDPE, e o saco plástico UV-degradável não pareceram experimentar qualquer degradação.

## ***Instalação de Compostagem de MSW In-vessel no Município de Mariposa***

A instalação de compostagem está localizada no aterro de Mariposa. A usina de 50.000 pés quadrados pode aceitar aproximadamente 40 toneladas de lixo sólido municipal (MSW) por dia.

O processo de compostagem *in-vessel* utiliza o Sistema de Composto por Engenharia (ECS).<sup>[93]</sup> O SV Composter™ apresenta excelente controle de temperatura e umidade em um recinto blindado feito de concreto e aço inoxidável. O MSW é colocado no recinto e o ar é distribuído igualmente para os materiais em compostagem através de revestimentos perfurados no solo. O vazamento de umidade e água é coletado no chão e drenado para um poço coletor. A remoção da água auxilia a reduzir as condições anaeróbicas. O processo de compostagem ECS *in-vessel* tem um controle de sistema baseado em PC que mensura a temperatura e a pressão de vários locais na pilha do composto e no recipiente do composto. Os materiais MSW são sujeitados a um regime de temperatura que destrói patógenos nos primeiros três dias, e depois maximiza a compostagem nos três dias seguintes com aeração, drenagem e controle de temperatura adequados. O composto *in-vessel* é tipicamente aquecido a 60°C durante três dias, e depois mantido a 58°C por 14 a 21 dias. O processo de compostagem reduz tipicamente o volume do MSW em 30 a 60 por cento.

### **Materiais e Procedimentos**

Controles biodegradáveis e compostáveis, e amostras oxodegradáveis foram colocadas em sacos de anagem juntamente com lixo sólido municipal (MSW) do local de composto e depois enterradas em composto *in-vessel*. Cerca de 80 g de amostras de tamanho natural foram misturadas com aproximadamente 1 quilo de MSW. Do mesmo modo como ocorreu com o experimento de composto Vacaville, as amostras incluíram BioBag à base de amido de milho, saco Mirel, saco BioTuf Ecoflex, saco Husky, tampas em PLA, tampas de cana-de-açúcar, e papel Kraft. Foram também enterrados *shrinkwrap* de polietileno, saco plástico UV-degradável, e saco plástico oxodegradável. Os detritos incluíram garrafas plásticas de água, copos de plástico, canudos de plástico, jornal, garrafas de vidro, tampas de metal, produtos de mistura de papéis, e sacos de plástico.

Os plásticos compostáveis e degradáveis foram enterrados em 30 de setembro de 2006. Após 14 dias, o experimento teve de ser recomeçado devido a problemas com o composto que resultou em temperaturas baixas. Lixo verde e esterco foram acrescentados ao recipiente e o processo foi recomeçado em 15 de outubro de 2006. A temperatura e a umidade do composto foram registradas por unidade de controle de processo. Após 50 dias, os materiais foram removidos do recipiente ECS, e colocados em um canteiro de concreto para esfriar e aerar. Filtros biológicos removeram gases nocivos do composto. O experimento terminou em 3 de dezembro de 2006.

Tipicamente, a pilha do composto é filtrada para materiais recicláveis, como por exemplo, vidro, metal, e plástico, e para detritos. Os materiais recicláveis são recuperados e os detritos enviados para o aterro. O composto filtrado é usado como revestimento para o aterro. Em nosso experimento, as amostras compostáveis e biodegradáveis foram removidas dos sacos de anagem e colocados em sacos plásticos perfurados. Alguns dos sacos de anagem possuíam furos. As amostras e os sacos foram relocados para o local de composto de Vacaville e colocados na pilha estática para compostagem adicional de 120 dias.

Durante o experimento, a temperatura média mais alta foi de 56.4°C, a temperatura mais baixa foi de 56.3°C, a pressão de abastecimento foi de 1.5 em H<sub>2</sub>O, a temperatura de abastecimentos foi de 28.2°C, e a temperatura de exaustão foi de 34.7°C. Fotos dos fragmentos plásticos durante esse experimento são mostradas no Anexo F.

### **Resultados**

Após 180 dias, os resultados foram idênticos aos resultados do composto *in-vessel* de Vacaville. Os materiais que se degradaram completamente incluíram tampas em PLA, sacos Mirel, sacos Ecoflex, sacos Husky, e sacos de lixo à base de amido de milho. Fragmentos pequenos de tampas de cana-de-açúcar e papel Kraft eram visíveis. Os fragmentos de cana-de-açúcar e de papel Kraft estavam muito úmidos e desintegraram quando foram pegos, tal como ocorreu com os resultados do composto de Vacaville. O papel Kraft e os fragmentos de cana-de-açúcar não se biodegradaram completamente devido à segregação nos sacos plásticos. Se os materiais houvessem sido colocados no solo do composto, teria ocorrido uma maior degradação, devido à melhor interação com o solo de composto.

Os sacos de plástico oxobiodegradáveis, os sacos plásticos em LDPE, e o saco plástico UV-degradável não pareceram experimentar qualquer degradação.

## Efeitos de Contaminação de Plásticos Degradáveis em Plásticos Reciclados

O polivinil cloride (PVC) é um contaminante de tereftalato de polietileno (PET) e de polietileno de alta densidade (HDPE). As concentrações de PVC de 200 ppm podem degradar PET de forma significativa durante o processo de extrusão de composto. A contaminação de PVC pode também causar descoloração do PET, viscosidade intrínseca mais baixa, e raias e manchas negras em produtos moldados.<sup>[94]</sup> Também, a contaminação de PVC pode levar à corrosão excessiva do equipamento de processamento, devido à evolução de ácido hidrolórico do PVC degradado.<sup>[95]</sup> O LDPE pode ser contaminado com HDPE, o que pode causar sérios problemas de processamento na manufatura de sacos plásticos. Os recipientes de HDPE podem ser contaminados com PVC, PS, PP, e colas de rótulos.

Os efeitos da contaminação são minimizados por meio da melhoria das técnicas de seleção, e por testes regulares em materiais que chegam. Métodos automáticos de seleção escolhem o plástico eficiente e rapidamente, utilizando técnicas espectroscópicas. Centenas de identificações por segundo podem auxiliar na seleção de plásticos com mais de 99 por cento de precisão<sup>[96]</sup> a uma relação de produção de 2.000 quilos por hora.<sup>[97]</sup>

A qualidade da resina (PCR) pós-consumo pode ser melhorada com um protocolo de garantia de qualidade que fornece métodos de ensaios eficientes, confiáveis, e práticos para PCR.<sup>[98]</sup> Os ensaios incluem índice de fusão, densidade, e porcentagem de umidade do PCR.<sup>[99]</sup>

Os plásticos degradáveis podem afetar negativamente a qualidade e as propriedades mecânicas de plásticos reciclados, se forem misturados com os plásticos reciclados. A contaminação de plásticos degradáveis, biodegradáveis e oxodegradáveis pode ser tratada como uma outra contaminação em plásticos. Os efeitos da contaminação degradável podem ser avaliados por meio de mensuração de propriedades físicas e mecânicas dos plásticos. Em particular, PET contaminado com PLA, HDPE contaminado com PLA, LDPE contaminado com plástico oxidegradável, e LDPE contaminado com plásticos biodegradável à base de amido de milho podem ser todos avaliados. Os efeitos são mensurados para índice de fusão, densidade, porcentagem de umidade, e cavidades e bolhas em filme de 1". As propriedades mecânicas incluem propriedades de tração e impacto.

### ***Procedimentos de Ensaio***

Os efeitos da contaminação foram avaliados misturando-se contaminantes com o material plástico reciclado apropriado, e em seguida fundição por injeção nos mesmos em barras de tração e impacto. O material plástico reciclado pós-industrial LDPE e HDPE foi fornecido pela Bay Polymers. O PLA foi misturado seco com PET e HDPE a 5 por cento e 10 por cento por meio de concentrações de peso. Infelizmente, a fundição por injeção do PET não foi bem sucedida devido ao alto índice de fusão do PET. O HDPE sofreu fundição por injeção com sucesso. Os sacos BioBag oxodegradáveis e biodegradáveis foram primeiramente cortados em pedaços pequenos e depois colocados em forno infravermelho, onde foram amaciados. Os pedaços de plástico foram prensados em folhas finas, e depois cortados em esmeril para criar um lote principal de 100 por cento de pellets plásticos. Os pellets plásticos do lote principal foram misturados a seco com pellets de LDPE, e depois moldados por injeção.

Os pellets foram moldados por injeção em barras de tensão com uma máquina de fundição de injeção Arburg 320-A 55-ton. As barras de tração LDPE e HDPE foram produzidas sob as seguintes condições: temperatura da parte traseira de 200°C, temperatura da zona central de 230°C, temperatura da zona frontal de 240°C, temperatura do esguicho de 240°C, pressão de injeção de 203 MPa, pressão do fardo de 105 MPa, tempo de resfriamento de 35 segundos, tempo de injeção de um segundo, e tempo do fardo de um segundo. Trinta amostras de barra de tração e barra de impacto foram moldadas para cada material com uma purgação de *Insta-purge* entre cada tipo de material.

### ***Resultados***

A umidade foi muito baixa em todos os materiais plásticos. O plástico oxodegradável apresentou o mesmo conteúdo de umidade que o LDPE. Os plásticos PLA-HDPE e BioBag-LDPE biodegradáveis tiveram conteúdo de umidade ligeiramente mais alto do que os plásticos de

HDPE e LDPE somente. O conteúdo de umidade das amostras de plástico foram mensurados com um analisador de umidade Satorius. A umidade do LDPE e do HDPE foram inferiores a 0.3 por cento. O LDPE com o saco plástico oxodegradável foi também inferior a 0.3 por cento. O LDPE com plástico biodegradável BioBag ficou entre 0.4 e 0.8 por cento. O HDPE com PLA ficou entre 0.3 e 0.6 por cento. O conteúdo de umidade de PET foi também aumentado de maneira significativa com a adição de PLA. A umidade aumentada em PET poderia ser deletéria.

A gravidade específica foi mensurada com instrumento de densidade eletrônica, modelo MD-300S, da Qualitest Incorporated. Veja a tabela 13 com os resultados. Quando misturados a 20 por cento, o plástico oxodegradável e os plásticos biodegradáveis BioBag aumentaram a densidade do plástico reciclado LDPE em 2.2 e 5.2 por cento. O PLA aumentou a densidade do plástico reciclado HDPE em 5.3 por cento com a adição de 10 por cento de contaminante. A densidade média de canudos de PLA foi mensurada como sendo de 1.19 g/cc, com desvio padrão de 0.03 g/cc.

O índice de fusão é uma indicação da viscosidade do material.<sup>[100]</sup> O índice de fusão das amostras foi mensurado com um indexador de fluxo de fusão da série LMI 4002 da Qualitest Incorporated. Os pellets de plástico foram adicionados a uma câmara aquecida e escoaram através de uma matriz tubular enquanto um pistão de contra-peso se movia através da parte superior do cilindro. O índice de fusão - com unidades de g/10-min - está registrado para materiais baseados em escoamento de plástico durante um intervalo de dez minutos a uma temperatura prescrita e massa de pistão.<sup>[101]</sup> O procedimento para realização do teste está detalhado na norma ASTM D-1238. O ensaio de índice de fusão para polietileno é realizado a 190°C com uma carga de 2.16 quilos. O índice de fusão foi modificado de forma significativa com a adição de plásticos oxodegradáveis ao LDPE, plásticos biodegradáveis à base de amido de milho a LDPE, e PLA adicionado a HDPE. O índice de fusão do PET foi também aumentado de forma significativa com a adição de PLA. A variação da concentração nas amostras fez com que os resultados do índice de fusão apresentassem algumas inconsistências. Futuras pesquisas poderão avaliar melhor as causas de variações do índice de fusão.

Os resultados do teste de qualidade para os materiais são mostrados na Tabela 13. Foi feita uma média dos resultados do índice de fusão, densidade e umidade para cinco amostras. Os resultados indicam que o índice de fusão é afetado de forma significativa com a adição de contaminantes plásticos oxodegradáveis e biodegradáveis. A densidade é afetada moderadamente por contaminantes, e o conteúdo de umidade é minimamente afetado pela presença de contaminantes degradáveis.

Os efeitos de contaminação nas propriedades do filme foram avaliados quanto à neblina, opacidade, e impacto de dardo. A aparência física do LDPE claro foi afetada dramaticamente pela adição dos contaminantes plásticos oxodegradáveis e BioBag. O plástico misturado apresentou raias de verde e de outras cores escuras. A quantidade de luz passando através do filme foi mensurada com um medidor de opacidade. Os contaminantes reduziram a opacidade de LDPE e fizeram com que ele parecesse mais opaco. A força do impacto do filme plástico foi reduzida em 20 a 50 por cento com a adição de dez por cento e vinte por cento de contaminantes plásticos biodegradáveis e oxodegradáveis. Com a adição de 20 por cento de contaminante plástico oxodegradável, foi impossível produzir um saco plástico com LDPE, devido a instabilidades de bolha.

**Tabela 13. Resultados de teste de qualidade para LDPE e HDPE com oxo- e bio- contaminação**

Material	Índice de fusão (g/10 min)	Densidade (g/cc)	Opacidade	Espessura (mils)	Impacto (Gota máxima g)
LDPE - líquido	0.711	0.906	19.8	3.2	226
LDPE - 10% oxodegradável	0.597 (-16%)	0.911 (0.55%)	19.7	3.4	102
LDPE - 20% oxodegradável	0.664 (-6.6%)	0.926 (2.2%)	17.9	N/A	N/A
LDPE - 10% BioBag	0.646 (-9.1%)	0.929 (2.5%)	19.7	3.5	192
LDPE - 20% BioBag	0.778 (9.4%)	0.953 (5.2%)	19.5	4	177
HDPE - líquido	11.07	0.945			
HDPE - 5% PLA	11.57 (4.5%)	0.958 (1.4%)			
HDPE - 10% PLA	4.154 (-62.5%)	0.995 (5.3%)			

As barras de tração foram testadas com máquina de teste de tração MTS - MTS QT/50, com 50 kN Load Cell e software Qtest. As amostras foram tracionadas em modo de tração a uma taxa de 1.5 polegadas por minuto à temperatura ambiente. Os resultados dos testes mecânicos para materiais estão demonstrados nas Tabelas 14 e 15. Os resultados indicam que o plástico oxodegradável teve muito pouco efeito na força de tração do LDPE.

O plástico oxodegradável reduziu o módulo de tração entre 10 e 15 por cento e aumentou o alongamento na fragmentação entre 23 e 28 por cento. As diferenças são um resultado das formulações dos diferentes plásticos LDPE no saco oxodegradável e no Bay Polymer.

O plástico biodegradável teve um efeito negativo no LDPE com uma redução de nove por cento da força de tração e oito por cento de redução em módulos para a amostra de 20 por cento de contaminação de plásticos biodegradáveis. Testes adicionais no futuro podem fornecer um entendimento melhor dos efeitos da contaminação nos plásticos reciclados.

**Tabela 14. Resultados de teste mecânico para LDPE e HDPE com oxo- e bio- contaminação**

Material	Tensão (interna) máxima resistente à tração, psi	Alongamento na fragmentação, %	Módulo de tensão interna, psi	Força do impacto, pés-libras
LDPE - líquido	1.689	138	10.791	9.6
LDPE - 10% oxodegradável	1.744	170	9.667	9.4
LDPE - 20% oxodegradável	1.738	178	9.278	9.4
LDPE - 10% BioBag	1.680	154	9.300	9.2
LDPE - 20% BioBag	1.540	127	10.247	9.3
HDPE - líquido	2.830	23	59.197	5.2
HDPE - 5% PLA	2.708	27.7	61.284	3.2
HDPE - 10% PLA	2.568	46.22	48.912	3.6

**Tabela 15. Resultados de teste mecânico para LDPE e HDPE com oxo- e bio- contaminação**

Material	Força de tensão	Alongamento final	Módulo de tensão	Força de impacto
	% de mudança	% de mudança	% de mudança	% de mudança
LDPE - líquido	0	0	0	0
LDPE - 10% oxodegradável	3.26	23.19	-10.42	-2.08
LDPE - 20% oxodegradável	2.90	28.99	-14.02	-2.08
LDPE - 10% BioBag	-0.53	11.59	-13.82	-4.17
LDPE - 20% BioBag	-8.82	-7.97	-5.04	-3.13
HDPE - líquido	0	0	0	0
HDPE - 5% PLA	-4.31	20.43	3.53	-30.77
HDPE - 10% PLA	-9.26	100.96	-17.37	-38.46

## Conclusões e Recomendações

No desenvolvimento de políticas estaduais e locais relacionadas aos usos ambientalmente benéficos de plásticos degradáveis, as pessoas com poder de decisão devem considerar primeiramente as implicações de qualquer política ou decisão de programa no desvio do lixo afetado e sistemas de descarte, e daqueles que o utilizam. Isto porque a melhora em uma área de um sistema pode às vezes afetar de maneira adversa uma outra parte do sistema. Por exemplo, está claro que os produtos de plástico compostáveis poderiam aumentar significativamente o desvio de lixo alimentar e de lixo verde porque as louças e utensílios de cozinha poderiam ser compostados juntamente com restos de alimentos, e os sacos utilizados para coletar lixo verde não precisariam ser separados antes da compostagem. Entretanto, plásticos degradáveis poderiam também contaminar o ciclo de reciclagem de plásticos existentes, caso não sejam coletados e compostados de maneira adequada, reduzindo, assim, as oportunidades de reciclagem de plásticos. Ademais, enquanto sacos compostáveis que atendem as normas ASTM irão se degradar em um ambiente de composto (com base nas condições experimentais deste estudo), a maioria não irá se fragmentar se for descartada em ambientes terrestres ou marítimos. Assim, é importante compreender que plásticos biodegradáveis ou compostáveis não são uma panacéia para a redução de descarte ou de lixo.

Recomenda-se que seja realizada pesquisa adicional para:

- Compreender melhor o destino dos plásticos degradáveis em ambientes terrestres e marinhos, e entender o efeito que resíduos de degradação podem ter sobre a vida selvagem, as plantas, e a vida marinha.
- Avaliar os riscos ambientais e o destino de produtos intermediários de outros plásticos biodegradáveis em ambientes de compostagem.
- Avaliar os custos de ciclo de vida incorridos durante a fabricação, coleta, e reprocessamento de sacos compostáveis comparados aos custos incorridos para administrar plásticos convencionais através de processamento, reciclagem, e descarte. Governos locais necessitam dessas informações para tomar decisões com base em dados sobre a utilização de sacos compostáveis.
- Propor uma lei requerendo o desenvolvimento de um código de identificação para sacos compostáveis e recipientes, para ajudar a identificar e separar plásticos compostáveis de plásticos recicláveis. A presença de material plástico degradável em recipientes de embalagem em plástico rígido e em sacos de lixo regulamentados dificultaria o atendimento à lei atual, e, conforme indicado acima, reduziria as oportunidades de reciclagem de plásticos.
- Avaliar outros plásticos degradáveis, incluindo materiais oxodegradáveis, em operações de composto comercial que utiliza compostagem *in-vessel* aeróbica.
- Realizar investigação adicional sobre a degradabilidade em ambientes marinhos e avaliar o ciclo de vida dos plásticos degradáveis.
- Compreender melhor a biodegradação de polímeros compostáveis e biodegradáveis no ambiente marinho.
- Realizar uma avaliação adicional em relação aos efeitos de contaminação dos plásticos degradáveis em plásticos reciclados.
- Avaliar melhor as variações em índice de fusão.



## Anexos

### Anexo A. Cálculos

A concentração de ppm de CO<sub>2</sub> no recipiente do composto é encontrada convertendo-se a concentração de ppm que é mensurada na garrafa de mensuração de 320-ml para uma concentração de ppm do recipiente de 3.8L de composto. Em primeiro lugar a quantidade de g-mols de CO<sub>2</sub> presente na garrafa de mensuração de 320-ml é determinada pela diferença de concentração de ppm entre a garrafa de 320-ml, e da quantidade conhecida de CO<sub>2</sub> dos recipientes de composto, e da concentração prévia de ppm de CO<sub>2</sub> no recinto. A diferença representa a quantidade de g-mols que foi acrescentada ao recipiente de 320 ml.

A taxa de escoamento de gás é mensurada com um tubo de escoamento. O declive da mensuração de ppm versus o tempo é calculada. A quantidade de gás adicionada ao recipiente de 320 ml é calculada com base no tempo exigido para alcançar o nível máximo de ppm e da taxa de escoamento de gás.

Em segundo lugar, a concentração, em g-mols/ml, que é a concentração de CO<sub>2</sub> no recipiente do composto, pode ser convertida a concentração de ppm de CO<sub>2</sub> com o uso da relação da Lei de Gás Ideal, descrita na Equação 3.<sup>[102]</sup> O peso gram- molecular para o CO<sub>2</sub> é de 44 g/mol.

$$ppm = \frac{RT}{P \times MW} \times mg/m^3 \quad \text{Equação 3}$$

Onde  $P$  é a pressão no recipiente em mm Hg  
 $R$  é a constante do gás universal, 62.4 (L- mmHg)/(°K -mol)  
 $T$  é a temperatura em Kelvin  
 $MW$  é o peso molecular em grama, g/mol

Em terceiro lugar, a concentração de CO<sub>2</sub> (em ppm) pode ser convertida para mg/m<sup>3</sup> multiplicando-se a mensuração ppm pelo peso molecular gram de CO<sub>2</sub> e em seguida dividindo-se por 24.45. Isso é válido quando as mensurações são tomadas a 25°C e a pressão atmosférica é de 760 torr (760 mm Hg). Para temperaturas e pressões diferentes destas, a concentração de dióxido de carbono pode ser convertida de ppm para mg/m<sup>3</sup>, conforme descrito na Equação 3. A quantidade total de carbono é a concentração de carbono em gramas por litro, vezes o volume do gás na câmara de 1 litro, conforme descrito na Equação 4.

$$mg/m^3 = \frac{P}{(RT)} \times MW \times ppm \quad \text{Equação 4}$$

Onde  $P$  é a pressão no recipiente em mm Hg  
 $R$  é a constante do gás universal, 62.4 (L- mmHg)/(°K -mol)  
 $T$  é a temperatura em Kelvin  
 $MW$  é o peso molecular em grama, g/mol

Em quarto lugar, os gramas de CO<sub>2</sub> podem ser convertidos em gramas de carbono, multiplicando-se pela massa atômica de carbono (12g), e dividindo-se em seguida pelo peso molecular de CO<sub>2</sub> (44g), conforme descrito na Equação 5.

$$g_c = g_{CO_2} \times \frac{12}{44}$$

**Equação 5**

Por fim, a porcentagem da biodegradação dos materiais é calculada dividindo-se a produção média de carbono gasoso líquido do composto do teste pela quantidade média original do carbono na amostra compostável, e multiplicando-se por 100, conforme descrito na Equação 6.

$$\% \text{ biodegradação} = \frac{\text{meio}C_{g, \text{ teste}} - \text{meio}C_{g, \text{ em branco}}}{C_1} \times 100$$

**Equação 6**

Onde  $C_g$ , teste é a quantidade de carbono gasoso produzido na amostra, g  
 $C_g$ , em branco é a quantidade de carbono gasoso produzido somente em solo de composto em branco, g  
 $C_i$  é a quantidade de carbono no composto de teste adicionada, g

Um método alternativo para calcular a quantidade de carbono presente na concentração de ppm envolve um cálculo mais simples, que relaciona a densidade de CO<sub>2</sub> e a densidade do ar nos diferentes volumes de gás. O cálculo se dirige ao percentual de volume de CO<sub>2</sub> no recipiente de mensuração inicial, comparado ao percentual de volume após a adição de amostra do gás de composto.

Primeiro, a concentração de ppm de gás no recipiente de mensuração de 320-ml é convertida à porcentagem de volume de CO<sub>2</sub>, usando a Equação 6. Note que ppm é massa de substância dividida por 1 milhão de vezes a massa da solução. Dessa forma, 400 ppm de CO<sub>2</sub> representa 0.004% CO<sub>2</sub>.

$$\text{vol\% } CO_2 = \text{ppm } CO_2 \frac{P_{ar}}{P_{CO_2}} \times 100$$

**Equação 7**

Onde  $P_{ar}$  é a densidade do ar, 1.2928 g/cc a 25 °C e 1 pressão de atmosfera  
 $P_{CO_2}$  é a densidade de CO<sub>2</sub>, 1.9768 g/cc a 25 °C e 1 pressão de atmosfera

Em segundo lugar, a fração de volume de CO<sub>2</sub> presente na concentração inicial é multiplicada pelos 320-ml de volume para produzir o volume de CO<sub>2</sub>, que é convertido em massa de CO<sub>2</sub>. De forma semelhante, a concentração de ppm após a amostra de gás a ser adicionada é também convertida em massa de CO<sub>2</sub>.

Em terceiro lugar, os dois valores de massa são subtraídos para que se obtenha a massa de CO<sub>2</sub> que está presente no recipiente.

Por fim, a concentração de massa é multiplicada pelo volume do recipiente do composto para produzir a massa de CO<sub>2</sub> que está presente do processo de biodegradação. Como antes, a massa de CO<sub>2</sub> pode ser convertida em massa de carbono que irá determinar a taxa de biodegradação dos materiais compostagem.

***Anexo B. Fotos de Amostras no Laboratório Experimental da  
CSU Chico***

**Recipiente de PLA (120 dias)**

**Saco de Amido de Milho (120 dias)**

**Início da Celulose**

**Final (45 dias)**

**Início do Papel Kraft**

**Final (45 dias)**

**Saco LDPE - Início**

**Final (45 dias)**

**BioBag - Início**

**Final (45 dias)**

**PLA - Início**

**Final (45 dias)**

**Cana-de-açúcar - Início**

**Final (45 dias)**

**Mirel PHA - Início**

**Final (45 dias)**

**Ecoflex - Início**

**Final (45 dias)**

**Plástico oxodegradável - Início**

**Final (45 dias)**

***Anexo C. Fotos de Amostras na Fazenda da CSU Chico***

**Composto In-vessel**

**Windrow - Fazenda da Universidade**

**Abertura de Amostra In-vessel**

**Recebimento de Lixo**

**Recipiente de PLA (120 dias)**

**Saco de Amido de Milho (120 dias)**

***Anexo D. Fotos de Amostras na Instalação de Compostagem Municipal da Cidade de Chico***

**Pilha de Composto Windrow - primeiro dia**

**Instalação de Composto da Cidade de Chico**

**Pilha de Composto Windrow (120 dias)**

**Recebimento de Lixo**

**Recipiente de PLA (120 dias)**

**Saco de Amido de Milho(120 dias)**



**Saco Oxodegradável (120 dias)**

**Saco Oxodegradável (120 dias)**

**Detritos de Garrafa Plástica (120 dias)**

**Detritos de Plástico (120 dias)**

*Anexo E. Fotos de Amostras na Instalação de Composto In-Vessel de Vacaville*

**Pilha de Composto In-vessel (primeiro dia)**

**Pilha de Composto Windrow (30 dias)**

**Pilha Estática (60 dias)**

**Sacos de Aniagem**

**Papel Kraft e cana-de-açúcar (180 dias)**

**Oxodegradável e UV-degradável (180 dias)**

*Anexo F. Fotos de Amostras na Instalação de Composto In-vessel de Mariposa*

**Recipiente de composto *in-vessel*ECS**

**Câmara interna com amostras e MSW**

**Pilha estática no local de composto de Vacaville**

**Papel Kraft e cana-de-açúcar (170 dias)**

**Saco plástico oxodegradável (170 dias)**

**Oxodegradável, UV degradável, saco LDPE, e detritos (170 dias)**

## *Anexo G. Protocolo Experimental para Locais de Compostagem*

O protocolo experimental para locais de compostagem comercial é o seguinte:

### 1. Instalação de composto de lixo verde de Chico

- Coloque as amostras na pilha de composto e misture com lixo verde.
- Revolva o composto duas vezes por semana com revolvedor de *windrow* de tamanho industrial.
- Remova a amostra de composto para o solo de teste, incluindo pH, porcentagem de umidade, porcentagem de sólidos, e índice de maturidade.
- Observe a fragmentação e a desintegração uma vez por mês e registre com câmera digital.
- Após 120 dias remova a amostra de composto para teste de solo, incluindo pH, porcentagem de umidade, porcentagem de sólidos, e índice de maturidade.

### 2. Instalação de composto de esterco da fazenda da Universidade

- Coloque as amostras na pilha de composto e misture com esterco e lixo de palha.
- Coloque saco de Ag sobre o composto.
- Após 30 dias remova o saco de Ag.
- Revolva o composto duas vezes por semana com revolvedor de *windrow* de tamanho industrial.
- Remova a amostra de composto para teste de solo, incluindo pH, porcentagem de umidade, porcentagem de sólidos, e índice de maturidade.
- Observe fragmentação e desintegração uma vez por mês, e registre com câmera digital.
- Após 120 dias remova a amostra de composto para teste de solo, incluindo pH, porcentagem de umidade, porcentagem de sólidos, e índice de maturidade.

### 3. Instalação de composto de lixo alimentar *in-vessel* de Vacaville

- Coloque as amostras em saco plástico perfurado e coloque em pilha de composto com lixo alimentar e lixo municipal.
- Coloque saco de Ag sobre o composto.
- Após 30 dias remova o saco Ag.
- Revolva o composto duas vezes por semana com revolvedor de *windrow* de tamanho industrial.
- Remova a amostra de composto para teste de solo, incluindo pH, porcentagem de umidade, porcentagem de sólidos, e índice de maturidade.
- Observe fragmentação e desintegração uma vez por mês, e registre com câmera digital.
- Após 60 dias, remova sacos de amostra degradável da pilha de composto, e coloque na pilha estática.
- A cada 30 dias, remova as amostras degradáveis dos sacos e observe a fragmentação e a desintegração. Registre com câmera digital.
- Após 180 dias remova a amostra de composto para teste de solo, incluindo pH, porcentagem de umidade, porcentagem de sólidos, e índice de maturidade.

4. Instalação de composto de lixo sólido municipal (MSW) *in-vessel* do município de Mariposa

- Coloque as amostras em saco plástico perfurado e coloque em uma pilha de composto com MSW em câmara de compostagem de concreto de ECS.
- Após 30 a 45 dias remova as amostras da câmara de ECS.
- Revolva o composto duas vezes por semana com um revolvedor *windrow* de tamanho industrial.
- Remova a amostra de composto para teste de solo, incluindo pH, porcentagem de umidade, porcentagem de sólidos, e índice de maturidade.
- Observe a fragmentação e a desintegração uma vez por mês e registre com câmera digital.
- Após 60 dias remova sacos de amostra degradável da pilha de composto e coloque em pilha estática.
- A cada 30 dias, remova amostras degradáveis dos sacos e observe a fragmentação e a desintegração. Registre com câmera digital.
- Após 170 dias remova a amostra de composto para teste de solo, incluindo pH, porcentagem de umidade, porcentagem de sólidos, e índice de maturidade.

## Fontes das Notas de Referência

- [1] Shima Masayuki. "Biodegradation of plastics." *Current opinion in Biotechnology*, 12:242-247 (2001)
- [2] D. Coleman and D. Crossley, *Fundamentals of Soil Ecology*, Academic Press Limited, London, UK (1996)
- [3] C. Bastioli, *Handbook of Biodegradable Polymers*, Rapra Technology Limited, p 133 (2005)
- [4] Steve Mojo, "What you need to Know about California's New Labeling Legislation," *Die Line*, California Film Extruders & Converters Association, pp 10-11 (December 2004)
- [5] "BPI Logo Program", <http://www.bpiworld.org/> (October 2005)
- [6] R. Narayan and S. Mojo, "Summary of ASTM D6400-99 Test Methods and Correlation to Composting Trials", <http://www.bpiworld.org/BPI-Public/News/Article.html> (October 2005)
- [7] "Most plastic grocery bags banned," *The Sacramento Bee*, pg A4 (March 28, 2007)
- [8] "Garbage/composting/recycling," <http://www.ci.hutchinson.mn.us/composting.htm> (May 2007)
- [9] C. Foster, "Degradable Plastic Bags, A European Perspective," Report to ExcelPlas, Department of Environment and Heritage, Australia (July 2002)  
<http://www.deh.gov.au/settlements/publications/waste/degradables/impact/> (August 2005)
- [10] "Biodegradable Polyesters: Packaging Goes Green,"  
<<http://www.plasticstechnology.com/articles/200209fa3.html>> (August 2005)
- [11] Advanced BioPlastics Conference 2004, January 2005,  
<http://www.ibaw.org/ibaw.symposium.com/>
- [12] Ibid.
- [13] "Biodegradable Plastic: Developments and Environmental Impacts," Australian Government, Department of the Environment and Heritage,  
<http://www.deh.gov.au/industry/waste/biodegradable/> (October 2002)
- [14] "ADM and Metabolix Announce First Commercial Plant for MIRELNatural Plastics," <  
[http://www.admworld.com/naen/pressroom/newspopup.asp?id=378&name=Commercial\\_Plant\\_f\\_or\\_PHA\\_Announced](http://www.admworld.com/naen/pressroom/newspopup.asp?id=378&name=Commercial_Plant_f_or_PHA_Announced) (September 2006)
- [15] "Eastman aims to raise profile of specialty plastics,"  
<http://www.plasticsnews.com/k2001/news2.html?cat=34&id=1005150602> (September 2006)
- [16] "Cereplast Boosts Production,"  
[http://www.cereplast1.com/ce/index.php?option=com\\_content&task=view&id=59&Itemid=73](http://www.cereplast1.com/ce/index.php?option=com_content&task=view&id=59&Itemid=73) (September 2006)
- [17] "Zerust selects BASF's Ecoflex® polymer for compostable plastic leaf bags,"  
[http://www.basf.com/corporate/news2006/012406\\_Zerust.htm](http://www.basf.com/corporate/news2006/012406_Zerust.htm) (September 2006)
- [18] Michael A. Verespej, "Winning Technologies: Polylactide Polymers," *Industry Week* (July 11, 2000)
- [19] "NOVA SPA Reached Global Settlement on Patent Litigation,"  
<http://www.materbi.com/ing/html/allegato.php?tipo=comunicato&id=35> (September 2006)
- [20] Schimmel, K, et.al, "Biodegradable Polymer Characterization Laboratory," *Proceedings of the 2004 American Society for Engineering Education Annual Conference*, American Society of Engineering Education, session 3613 (June 2004)
- [21] "Welcome to EPI," <http://www.epi-global.com/en/Index-e.htm> (March 2006)
- [22] "Oxo-Biodegradable," [http://www.biodegradableplastics.net/products\\_pdq.html](http://www.biodegradableplastics.net/products_pdq.html)
- [23] "Polystarch additives," [http://www.biodegradableplastics.net/products\\_pmp.html](http://www.biodegradableplastics.net/products_pmp.html) (March 2006)

- [24] "Decomposing Cutlery: Biocorp Makes its Mark in Biodegradable Plastics," <http://www.carbohydrateconomy.org/> (March 2006)
- [25] "Life Cycle Assessment (LCA)," [http://www.scienceinthebox.com/en\\_UK/sustainability/definition\\_en.html](http://www.scienceinthebox.com/en_UK/sustainability/definition_en.html) (April 2007)
- [26] C. Bastioli, *Handbook of Biodegradable Polymers*, Rapra Technology Limited (2005) p 432
- [27] Ibid.
- [28] Ibid.
- [29] "LCA of Mater-Bi bags," [http://www.materbi.com/ing/html/prodotto/cosematerbi/lca\\_edp.html#](http://www.materbi.com/ing/html/prodotto/cosematerbi/lca_edp.html#)
- [30] "Life Cycle Assessment of Natureworks PLA," <http://www.natureworkslc.com/Our-Values-and-Views/Life-Cycle-Assessment.aspx>
- [31] P. Gruber and M. O'Brien, "Polylactic NatureWorks™ PLA," *Biopolymers in 10 volumes, Volume 4, Polyesters III Applications and Commercial Products*, Edited by Doi, Y., Steinbuechel, A., Wiley-VCH, Weinheim, ISBN 3-527-30225-5. pp 235-249 (January 2002)
- [32] Nayaran R., Pettigrew C., "ASTM Standards Help Define and Grow a New Biodegradable Plastic Industry," *ASTM Standardization News* (December, 1999)
- [33] "D6400-04 Standard Specification for Compostable Plastics", [http://www.astm.org/cgi-bin/SoftCart.exe/DATABASE.CART/REDLINE\\_PAGES/D6400.htm?E+mystore](http://www.astm.org/cgi-bin/SoftCart.exe/DATABASE.CART/REDLINE_PAGES/D6400.htm?E+mystore) (May 2005)
- [34] Jakubowica, I., "Evaluation of degradable polyethylene (PE)," *Polymer Degradation and Stability*, V 80, N 1, pp 39-43, (2003)
- [35] "BPI's Compostable Logo effort is featured in the American Environmental Review Series," April 23, 2003, <http://chemical.press-world.com/v/9085/bpi-s-compostable-logo-effort-is-featured-in-the-american-environmental-review-series.html> (May 2005)
- [36] "The Status of Degradable Plastics for Composting," *BioCycle: Journal of Composting & Organics Recycling*, p. 60 (March 2002)
- [37] Ramani Narayan and Steve Mojo, "Summary of ASTM D6400-99 Test Method and Specifications," n.d., <http://www.bpiworld.org/Files/Article/ArtsJGyNe.pdf> (May 2005)
- [38] "City of Orilla Biodegradable Bag Study," December 2003, [www.bpiworld.org/Files/Article/ArttJInBM.pdf](http://www.bpiworld.org/Files/Article/ArttJInBM.pdf) (August 2005)
- [39] J. Kaiser, "Testing the performance and the disintegration of biodegradable bags for the collection of organic wastes," *Macromolecular Symposia* 165, p 115-122 (March 2001)
- [40] C. Bastioli, *Handbook of Biodegradable Polymers*, Rapra Technology Limited p 170 (2005)
- [41] UK's first compostable packaging certification scheme announced," <http://www.bpiworld.org/Files/Article/ArtsJGyNe.pdf> (April 2007)
- [42] International organization for standardization (ISO)," <http://www.iso.ch/iso/en/ISOOnline.frontpage> (April 2007)
- [43] "The impacts of degradable plastic bags in Australia," Final Report to Department of the Environment and Heritage, ExcelPlas Australia Centre for Design at RMIT, (September 11, 2003)
- [44] Ibid.
- [45] "Draft Australia Standards released for public comments," <http://www.deh.gov.au/settlements/publications/waste/degradables/newsletter/pubs/degradableissue2.pdf> (March 2006)
- [46] "Biodegradable Plastics Society," <http://www.bpsweb.net/english/english.htm> (April 2007)
- [47] "Making packaging greener – biodegradable plastics," February 2002, [http://www.science.org.au/nova/061/061print.htm#box\\_1](http://www.science.org.au/nova/061/061print.htm#box_1) (January 2005)

- [48] "Household Items and Food Service," n.d., [http://lepton.marz.com/ncga/comm\\_dev\\_center/product\\_detail.asp?product=Household+items+and+Foodservice&submit=Submit](http://lepton.marz.com/ncga/comm_dev_center/product_detail.asp?product=Household+items+and+Foodservice&submit=Submit) (January 2005)
- [49] "NatureWorks PLA Cups," n.d., <http://www.brenmarco.com/supermarket/SUPERMARKET%20LARGE%20PAGES/weimoncups.htm> (October 2005)
- [50] "BioBag and the Environment," n.d., [http://www.biobagusa.com/mater\\_bi.htm](http://www.biobagusa.com/mater_bi.htm) (May 2005)
- [51] "Plastic Litter and Waste Cleanup Costs Approach a Billion Dollars," [http://www.becnet.org/ENews/01sp\\_plastic.html](http://www.becnet.org/ENews/01sp_plastic.html), (March 2006)
- [52] Ibid.
- [53] "Household Items and Food Service", [http://lepton.marz.com/ncga/comm\\_dev\\_center/product\\_detail.asp?product=Household+items+and+Foodservice&submit=Submit](http://lepton.marz.com/ncga/comm_dev_center/product_detail.asp?product=Household+items+and+Foodservice&submit=Submit) (January 2005)
- [54] "Degradable bags can last for years," <http://www.bpiworld.org/Files/Article/Art57nOfv.pdf> (March 2006)
- [55] The impacts of degradable plastic bags in Australia, ExcelPlas Australia Centre for Design at RMIT, (September 11, 2003)
- [56] M. Booma et. al., *Journal of Elastomers and Plastics*, **26** 104 (1994)
- [57] E. Chiellini and R. Solaro, *Advanced Materials*, **8** 305 (1996)
- [58] S. Piccinini et. al., *The Science of Composting*, Blackie Academic Publishers, London, pp 1271-1273
- [59] U. Witt et. al., "Biodegradation of aliphatic-aromatic copolyesters: evaluation of the final biodegradability and ecotoxicological impact of biodegradation intermediates," *Chemosphere* **44** 289-299 (2001)
- [60] J. Greene "Evaluation of the performance of rigid plastic packaging containers, bags, and food service packaging in full scale commercial composting," California Integrated Waste Management Board Publications, <http://www.ciwmb.ca.gov/Publications/default.asp?cat=12> (May 2007)
- [61] J. Kaiser, "Testing the performance and the disintegration of biodegradable bags for the collection of organic wastes," *Macromolecular Symposia*, 165, pp 115-122 (March 2001)
- [62] Pagga, Udo., "Biodegradability and compostability of polymeric materials in the context of European packaging regulation," *Polymer Degradation and Stability*, **59** 371-376 (1998)
- [63] "Glossary of Terms for Degradable Plastics," Government Department of Environment and Heritage <http://www.deh.gov.au/settlements/waste/degradables/glossary.html> Australian (August 2005)
- [64] "Standard Guide for Assessing the Compostability of Environmentally Degradable Plastics," ASTM Designation: D 6002 – 96 (Reapproved 2002) <http://www.mindfully.org/Plastic/Biodegrade/Compostability-Degradable-Plastics1mar02.htm> (August 2005)
- [65] "Phytotoxicity Tests for Soil Amendments," Woods End Research Laboratory, Inc. <http://www.woodsend.org/aaa/phytox.html> (August 2005)
- [66] "Safety data for sucrose," <http://physchem.ox.ac.uk/MSDS/SU/sucrose.html> (April 2007)
- [67] European Commission, "Commission Working Group on the Classification and Labelling of Dangerous Substances," [http://ecb.jrc.it/classlab/SummaryRecord/0894r3\\_sr\\_CM1094.doc](http://ecb.jrc.it/classlab/SummaryRecord/0894r3_sr_CM1094.doc) (May 2007)
- [68] "Organic Material In-vessel Composting," [http://www.p2pays.org/ref/20/19926/p2\\_opportunity\\_handbook/7\\_ii\\_a\\_3.html](http://www.p2pays.org/ref/20/19926/p2_opportunity_handbook/7_ii_a_3.html) (March 2006)
- [69] "Hot Rot Composting Systems," <http://www.hotrotsystems.com/> (March 2006)
- [70] "Solvita® Test Kit," <http://www.solvita.com/aaa/solvita.html> (December 2005).



- [71] "Stalk Market Info," <http://www.stalkmarket.net/infoSheet.htm> (May2007)
- [72] O. Chiparus, "Bagasse fiber for the production of nonwoven materials," Ph.D. Dissertation, Louisiana State University, (May 2004)
- [73] Fisherbrand Hollow Cathode Single-Element 2 in. dia. Lamps with Elements Aluminum to Platinum," n.d., <https://www1.fishersci.com/Coupon?cid=1328&gid=181949> (December 2005)
- [74] C. Bastioli, *Handbook of Biodegradable Polymers*, Rapra Technology Limited, p 34 (2005)
- [75] Ibid.
- [76] Ibid.
- [77] A. Andrady, "Weathering of Polyethylene (LDPE) and enhanced photodegradable polyethylene in the marine environment," *Journal of Applied Polymer Science*, **39**, 363-370 (1990)
- [78] "Accelerate environmental exposure, laboratory testing, and recyclability study of photo/biodegradable plastics," Final report, Research Triangle Institute (1991)
- [79] A. Andrady et. al. "Effects on climate change and UV-B materials," *Photochem. Photobiol. Sci.*, **2**, 68-71 (2003)
- [80] C. Bastioli, *Handbook of Biodegradable Polymers*, Rapra Technology Limited , p 36 (2005)
- [81] S. Iman et. al. "Degradation of starch-poly(B-hydroxybutyrate-co-B-hydroxyvalerate) bioplastic in tropical coastal waters," *Applied and Environmental Microbiology*, **65**, 2, 431 (1999)
- [82] H. Tsuji and K Suzuyoshi, "Environmental degradation of biodegradable polyesters 1. Poly(-caprolactone), poly[(R)-3-hydroxybutyrate], and poly(L-lactide) films in controlled static seawater, *Polymer Degradation and Stability* 75 (2) pp 347-355 (2002)
- [83] P. Shin et. al., "Environmental effects on polymeric matrix systems," *Journal of Environmental Polymer Degradation*, **5**, 1, 33 (1997)
- [84] "Briefing of the breakdown of organic matter by anaerobic organisms in environments lacking oxygen," Friends of the Earth FOE  
[http://www.foe.co.uk/resource/briefings/anaerobic\\_digestion.pdf](http://www.foe.co.uk/resource/briefings/anaerobic_digestion.pdf) (April 2007)
- [85] L. X. Zhou, et. al. "Sorption and Biodegradability of Sludge Bacterial Extracellular Polymers in Soil and Their Influence on Soil Copper Behavior," *J. Environ. Qual.* 33:154-162 (2004)
- [86] Ishigaki, T. et. al. "The degradability of biodegradable plastics in aerobic and anaerobic waste landfill model reactors," *Chemosphere* 54:225-233 (2004)
- [87] Angelidaki, I. et. al. "Thermophilic anaerobic digestion of source-sorted organic fraction of household municipal solid waste: Start-up procedure for continuously stirred tank reactor." *Water Research* 40: 2621-2628 (2006)
- [88] C. Cozzolino et. al. "Industrial application of semi-dry digestion process of organic solid waste." *Proceedings of the International Symposium on Anaerobic Digestion of Solid Waste. Venice*, pp 551-555 (1992)

- [89] Ruihong Zhang et. al. "Characterization of food waste as feedstock for anaerobic digestion." *Bioresource Technology*, Volume 98, Issue 4, March 2007, Pages 929-935 (2007)
- [90] Ibid.
- [91] "Compost windrow turner," November 1, 2001, [http://en.wikipedia.org/wiki/Compost\\_windrow\\_turner](http://en.wikipedia.org/wiki/Compost_windrow_turner) (December 2005)
- [92] "In-Vessel Composting Report (Rice Straw & Dairy Manure)," California State University, Chico, n.d., <http://www.csuchico.edu/agr/compost/arbstudy.html> (December 2005)
- [93] <http://www.compostsystems.com>
- [94] R. Dvorak and E. Kosior, "Development of a continuous thermals separation system for the removal of PVC contamination in post-consumer PET flake," *SPE ANTEC Papers 2001*, The Society of Plastics Engineers (May 2001)
- [95] J. Scheirs, *Polymer Recycling: Science, Technology and Applications*, Wiley Publishers (1998)
- [96] D. Wienke, et. al., "Adaptive resonance theory based neural network for supervised chemical pattern recognition. Part 2: Classification of postconsumer plastics by remote NIR spectroscopy using an InGaAs diode array," *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems* **32** 165-176 (1996)
- [97] Robert Dvorak, et. al., "Factors Influencing the Sorting Efficiency of Commingled Postconsumer Bottles using an Automated Sorting System," *SPE ANTEC Proceedings*, **III** (2000)
- [98] J. Greene, "Postconsumer Resin Quality Assurance and Testing Protocol," California Integrated Waste Management Board (CIWMB) Publications, <http://www.ciwmb.ca.gov/Publications/default.asp?pubid=1105> (March 2005)
- [99] J. Greene, "Postconsumer Resin (PCR) Quality Assurance and Testing Protocol: Proposed Testing Protocol for PCR," *SPE GPEC 2006 Global Plastics Environmental Conference*, (February 2006)
- [100] B. Nelson, "Improving the Accuracy of On-Line Melt Index Measurements," *SPE ANTEC Papers 1998*, The Society of Plastics Engineers, p 260 (May 1998)
- [101] J. Clay, "Melt Index from a Single Pellet," *SPE ANTEC Papers 2001*, The Society of Plastics Engineers p 47 (May 2001)
- [102] "Converting Occupational Exposure Limits from mg/m<sup>3</sup> to ppm," n.d., <http://www.ccohs.ca/oshanswers/chemicals/convert.html> (December 2005)