

Daliana Gomes Borges

**Aproveitamento de Embalagens Cartonadas em compósito de
Polietileno de Baixa Densidade**

**Exemplar Original: 2007
Exemplar Revisado: 2007**

**São Paulo
2007**

Daliana Gomes Borges

**Aproveitamento de Embalagens Cartonadas em compósito de
Polietileno de Baixa Densidade**

**Dissertação apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de São Paulo
para a obtenção do título de Mestre em
Engenharia**

**Área de Concentração:
Engenharia Metalúrgica e de Materiais**

**Orientador:
Prof. Dr. Jorge Alberto Soares Tenório**

**Exemplar Original: 2007
Exemplar Revisado: 2007**

**São Paulo
2007**

Este exemplar foi revisado e alterado em relação à versão original, sob responsabilidade única do autor e com a anuência de seu orientador.

São Paulo, 24 de setembro de 2007.

Assinatura do autor _____

Assinatura do orientador _____

FICHA CATALOGRÁFICA

Borges, Daliana Gomes

Aproveitamento de embalagens cartonadas em compósito de polietileno de baixa densidade / D.G. Borges. -- ed.rev. -- São Paulo, 2007.

97 p.

Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais.

**1.Embalagens (Reaproveitamento) 2.Materiais compósitos
I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais II.t.**

DEDICATÓRIA

Dedico esse trabalho ao amor da minha vida, Hamilton, pelo carinho, paciência e dedicação em todos os momentos, até nos mais difíceis em que me faltava coragem de continuar. Sem ele ao meu lado, esse trabalho não seria possível.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, ao meu orientador que com sua paciência soube me encaminhar até o trabalho final;

À minha mãe, o exemplo de minha vida, que me ensinou a ter força, coragem e determinação para conseguir o que realmente importa em nossa vida. Pelas vezes em que dizia “ai Daliana minha filha, não desista...” que tanto me motivou a continuar.

Pelo meu irmão Bruno (SIPF) pela força e as “risadas” nas vezes em que se referia a mim como “Olha...é minha irmã. Ela é Mestra!”

Ao meu irmão caçula, Adriel, que dava força do seu jeito falando “to nem aí”.

Pelo meu pai, pela compreensão do meu “sumiço” nos finais de semana, pelo seu silêncio que significava pra mim seu incentivo e orgulho que ele tem da “Catucha”. E claro, pelos deliciosos pães de queijo que até hoje não consigo viver sem!

Pelas minhas cachorras, Pandora (a lambe patinhas) e Hannah (pititicutita) por ficar ao meu lado, esquentando meus pés nas vezes em que passava horas na frente do computador;

Ao Sr. Fernando Neves da empresa Tetra Pak pela ajuda e incentivo.

À empresa Mercoplás pela doação das embalagens cartonadas picotadas.

Ao Elinton, da Cromex pela realização dos ensaios durante esse trabalho todo.

À Tectril, Sr. Milton, Sr. Nilo e Sra. Regina, pelos testes realizados na extrusora.

À Professora Maria Isabel, da Faeng/FSA pela correção gramatical do resumo e do abstract.

E aqueles que de alguma forma, passaram pela minha vida e que deixaram seu carinho.

RESUMO

A produção de materiais plásticos tem se elevado para 169 milhões de toneladas no mundo, no ano de 2003. Uma parte considerável destes polímeros sintéticos, 36% na Europa são destinados ao setor de embalagens. Estas matérias primas são utilizadas por um período de tempo bastante curto e geram um volume de descartes importante. Mesmo com um desenvolvimento considerável de linhas de gestão dos descartes, seu tratamento e sua eliminação colocam ainda problemas provenientes da dificuldade em reutilizar tais embalagens na forma em que são geradas, seja pelo estado de limpeza em que são descartadas, seja pela composição multi-material que é utilizada para sua produção. O presente trabalho busca o reaproveitamento de Embalagens Cartonadas pós-consumo como reforço em compósito com Polietileno de baixa densidade para i) maximizar o teor de ELV empregada no compósito e ii) melhorar o aspecto visual do compósito por meio de incorporação de concentrado de cores e corantes. Por meio do processo de extrusão, preparou-se o compósito na forma granulada. O material granulado foi moldado por injeção para obtenção dos corpos-de-prova para ensaios de tração. As propriedades viscosimétricas do compósito foram avaliadas por meio do Índice de Fluidez e a morfologia do compósito foi avaliada por meio de microscopia eletrônica de varredura e espectroscopia de energia dispersiva de raio X. Nas condições do trabalho pode-se afirmar que o teor de Embalagem Cartonada que apresenta o melhor conjunto de propriedades de tração está entre 20 e 25% (p/p) no compósito; a utilização de concentrado de cor para melhoria do aspecto visual do compósito não tem influência no conjunto de propriedades de tração do mesmo.

Palavras-chave: Embalagem Cartonada. Propriedades Mecânicas. Índice de Fluidez. MEV. EDS. PEBD.

ABSTRACT

Plastics materials production has increased to 169 million tons in the world in 2003. A great part of these synthetic polymers, it means 36% in Europe are used in packaging applications. These raw materials are used for a short time and produces a great volume of residues. Even with a great development of residues management, its treatments and elimination causes several problems due to difficulty in reuse these packages as its were discarded or the state of dirtiness in which they are discarded or even by the composition multi-material of these packages. This work has as a goal the reuse of Carton Packages (CP) post-use as a reinforcement in a Low Density PolyEthylene (LDPE), to i) maximize the content of CP in the composite and ii) improve the composite visual aspect by means of color masterbatches. With aid of extrusion process, the granuleted composite was prepared. These granulated was moulded by injection to obtain test specimens for mechanical tests. Composites viscosimetric proprieties and morphology were evaluated by means of Melt Index and Scanning Electronic Microscopy (SEM) and *Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy* (EDS). In the work conditions it can be postulate that the best content of CP in the composite that gives the best mechanical properties is between 20 and 25% (w/w); the use of color masterbatches for improve the composite visual aspects has no influence over mechanical properties.

Keywords: Carton Package. Mechanical Properties. Melt Index. SEM. EDS. LDPE.

Índice de Figuras

Figura 1: Estrutura da Embalagem cartonada	23
Figura 2: Esquema de classificação dos Compósitos.....	25
Figura 3: Embalagem cartonada lavada, seca e picotada.....	43
Figura 4: Polietileno de Baixa Densidade em forma de grãos.....	43
Figura 5: Concentrado de cor branco (TiO_2) em forma de grãos.....	44
Figura 6: Concentrado de cor Preto (Negro de fumo) em forma de grãos.....	45
Figura 7: Curvas de Tensão x Deformação para os compósitos (a) 0EC0B0P, (b) 20EC0B0P e (c) 30EC0B0P	53
Figura 8: Módulo de Elasticidade em função do teor de embalagem cartonada (ou Longa Vida) para amostras (a) apenas com TiO_2 , (b) apenas com Negro de Fumo, (c) com TiO_2 e Negro de Fumo (d) apenas com o polímero (PEBD).....	55
Figura 9: Tensão na Força Máxima em função do Teor de embalagem cartonada (ou Longa Vida) para amostras (a) apenas com TiO_2 , (b) apenas com Negro de Fumo, (c) com TiO_2 e Negro de Fumo e (d) apenas com o polímero (PEBD).....	57
Figura 10: Tensão de Ruptura em função do Teor de embalagem cartonada (ou Longa Vida) para amostras (a) apenas com TiO_2 , (b) apenas com Negro de Fumo, (c) com TiO_2 e Negro de Fumo e (d) apenas com o polímero (PEBD).....	59
Figura 11: Deformação na Força Máxima em função do Teor de embalagem cartonada (ou Longa Vida) para amostras (a) apenas com TiO_2 , (b) apenas com Negro de Fumo, (c) com TiO_2 e Negro de Fumo e (d) apenas com o polímero (PEBD).....	61
Figura 12: Deformação na Tensão de Ruptura em função do Teor de embalagem cartonada (ou Longa Vida) para amostras (a) apenas com TiO_2 , (b) apenas com Negro de Fumo, (c) com TiO_2 e Negro de Fumo e (d) apenas com o polímero (PEBD).....	63
Figura 13: a) Corpos de prova com concentrado de cor branco e b) corpos de prova com concentrado de cor preto	65
Figura 14: Imagens de elétrons secundários de amostra com 30% de embalagem cartonada mostrando aglomerados de papel e matriz descolada.	67
Figura 15: Imagens de elétrons secundários de amostra com 10% de embalagem cartonada mostrando aglomerados de papel com alumínio e matriz descolada.	68
Figura 16: Imagens de elétrons secundários de amostra com 5% de embalagem cartonada boa uniformidade nas partículas dispersas com pouca matriz descolada.	69
Figura 17: Imagens de elétrons secundários de amostra com 30% de embalagem cartonada mostrando aglomerados de material presente na embalagem cartonada com a presença de reentrâncias.	70
Figura 18: Imagens de elétrons secundários de amostra com 10% de embalagem cartonada mostrando aglomerados de material reciclado e com matriz descolada.	71
Figura 19: Imagens de elétrons secundários com 5% de embalagem cartonada mostrando uniformidade nas partículas de material reciclado.	72
Figura 20: Micrografia da amostra com 30% de embalagem cartonada (a), análise EDS da área nomeada "Spectre 1" (b).....	73
Figura 21: Micrografia da amostra com 30% de embalagem cartonada (a), análise EDS da área nomeada "Spectre 2" (b).....	74
Figura 22: Micrografia da amostra com 30% de embalagem cartonada (a), análise EDS da área nomeada "Spectre 3" (b).....	75
Figura 23: Micrografia da amostra com 10% de embalagem cartonada (a), análise EDS da área nomeada "Spectre 1" (b).....	76

Figura 24: Micrografia da amostra com 10% de embalagem cartonada (a), análise EDS da área nomeada “Spectre 2” (b).....	77
Figura 25: Micrografia da amostra com 5% de embalagem cartonada (a), análise EDS da área nomeada “Spectre 1” (b).	78
Figura 26: Micrografia da amostra com 5% de embalagem cartonada (a), análise EDS da área nomeada “Spectre 2” (b).	79
Figura 27: Micrografia da amostra com 5% de embalagem cartonada (a), análise EDS da área nomeada “Spectre 3” (b).	80
Figura 28: Índice de Fluidez em função do teor de embalagem para amostras (a) apenas com PEBD, (b) com 2% concentrado de cor preto, (c) com 2% concentrado de cor branco e (d) com 2% concentrado de cor preto e com 2% concentrado de cor branco.....	83

Índice de Tabelas

Tabela 1: Evolução da destinação de resíduos sólidos urbanos de 1989 e 2000 segundo IBGE.	17
Tabela 2: Preço do material reciclado no Brasil.....	19
Tabela 3: Principais características de alguns substratos usados em estruturas combinadas [14, 15, 16].....	22
Tabela 4: Variável independente estudada no processo	45
Tabela 5: Representação utilizada para os ensaios mecânicos	46
Tabela 6: Variáveis dependentes estudadas no processo.	46
Tabela 7: Matriz de Ensaios para o projeto fatorial	47
Tabela 8: Parâmetros operacionais utilizados na Extrusora.....	48
Tabela 9: Parâmetros operacionais utilizados na Injetora	49
Tabela 10: Parâmetros operacionais utilizados para os ensaios de Resistência à Tração	49
Tabela 11: Parâmetros operacionais utilizados para as micrografias.....	50
Tabela 12: Parâmetros operacionais utilizados para os ensaios de Índice de Fluidez.....	50
Tabela 13: Resultados dos ensaios de Resistência à Tração.....	52
Tabela 14: Resultados do ensaios de Índice de Fluidez	81
Tabela 15: Análise de Regressão Múltipla com as três variáveis independentes	85
Tabela 16: Análise de Regressão Múltipla com as duas variáveis independentes	85
Tabela 17: Análise de Regressão Múltipla com uma variável independente.....	86

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	12
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	14
2.1 Reciclagem	14
2.2 A Realidade Brasileira.....	16
2.3 Embalagens	20
2.4 Embalagens cartonadas	22
2.5 Compósitos	25
2.6 Compósitos reforçados com partículas	26
2.7 Compósitos Reforçados com Fibras	26
2.8 Propriedades mecânicas de Compósitos Poliméricos e Ensaio Normalizados	27
2.9 Processos de Fabricação da Embalagem Cartonada.....	27
2.10. Processos de Reciclagem de Embalagens Cartonadas	28
2.10.1 Reciclagem pelo Processo Hidrapulper.....	28
2.10.1.1 Processo via Plasma	29
2.10.2 Reciclagem por Compressão Térmica	30
2.10.3 Placas e Telhas.....	30
2.11. Outros compósitos de fibras com polímeros	31
3. OBJETIVOS	41
4. MATERIAIS E MÉTODOS	42
4.1 Materiais utilizados.....	42
4.1.1 Embalagem Cartonada.....	42
4.1.2 Polietileno de Baixa Densidade (PEBD).....	43
4.1.3 Concentrado de cor	44
4.1.3.1 Concentrado de cor branco	44
4.1.3.2 Concentrado de cor preto	44
4.2 Métodos utilizados	45
4.2.1 Projeto de experimentos (matriz de ensaios)	45
4.2.2 Preparação das amostras pelo processo de extrusão e injeção	47
4.2.3 Ensaio de Resistência à Tração	49
4.2.4 Micrografias.....	49
4.2.5 Índice de Fluidez	50
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES	51
5.1. Resultados de ensaio de Tração	53
5.2 Resultados da análise do aspecto visual dos corpos de prova.....	64
5.3. Análise das micrografias obtidas por Microscopia Eletrônica da Varredura associada à Análise de Energia Dispersiva de Raios-X	65
5.4. Análise de resultados de Índice de Fluidez.....	81
5.5. Análise de Regressão Múltipla.....	84
5.5.1. Análise de Regressão Múltipla para o Módulo de Elasticidade	84
5.5.2. Análise de Regressão Múltipla para as demais variáveis dependentes	87
6. CONCLUSÕES	88
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	89
8. ANEXO A	95
8.1. Planejamento estatístico – projeto fatorial	95

1. INTRODUÇÃO

Os avanços tecnológicos conduziram as antigas embalagens pesadas, frágeis e que conferiam baixíssima proteção aos alimentos, às modernas embalagens multicamadas.

Se um ponto positivo é a longa duração dos alimentos embalados nessas embalagens (que garantem assepsia, e também não necessitam de transporte refrigerado), um problema provocado pela sua utilização é geração de lixo de difícil reciclagem. Tais embalagens não são compostas por apenas um tipo de material, são compostas por 75% de papelão, 5% de alumínio e 20% de polímero (polietileno de baixa densidade). Dentre os processos mais comuns para recuperação dos componentes das embalagens cartonadas estão:

- a) Reciclagem das fibras – no equipamento desenvolvido para essa finalidade (Hidrapulper) as fibras do papelão são hidratadas e separadas do alumínio e do polímero (polietileno). Cada um dos componentes é então processado de forma individual;
- b) Prensagem – depois de picadas, as embalagens são prensadas em altas temperaturas e dessa forma, chapas semelhantes ao aglomerado de madeira são obtidas;
- c) Incineração – as embalagens são utilizadas na obtenção de energia térmica que pode ser transformada em outras formas de energia.

Por falta de uma cultura de reciclagem, apesar da alta produção, o índice de reciclagem de embalagens cartonadas no Brasil ainda é pequeno: em 1999, apenas 10% do total de embalagens cartonadas foram reciclados e em 2000, o índice foi aumentado para 15%, totalizando 22,5 mil toneladas.

De acordo com o CEMPRE – Compromisso Empresarial para Reciclagem, o volume da reciclagem no Brasil cresceu 4% (de 5 milhões de toneladas em 2003 para 5,2 milhões de toneladas em 2004). O Brasil recicla 95,7% (em peso) do total produzido das latas de alumínio para bebidas e 23% (em peso) do total anual produzido de embalagens Cartonadas, enquanto Colômbia recicla 5,6% e em seguida segue Argentina com 3,2% das embalagens cartonadas.

Neste contexto, o objetivo deste trabalho foi o de buscar o reaproveitamento de Embalagens Cartonadas pós consumo como reforço em compósito com Polietileno de baixa densidade por meio dos processos de extrusão e injeção. As técnicas adicionais utilizadas para a caracterização do compósito foram: Ensaio de Tração, Índice de Fluidez, a Microscopia Eletrônica de Varredura, Espectroscopia de Energia Dispersiva de Raio-X.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Reciclagem

Segundo LUNDI [1], palavra reciclagem significa o ato de extrair materiais de resíduos e reutilizá-los. Reciclagem geralmente inclui coleta, separação, processo, venda e a criação de um novo produto ou materiais provindos de materiais e produtos usados. Em geral, reciclagem refere a separação de materiais reciclados como jornais, alumínio, outros metais ou vidros de resíduos. Isto inclui reciclagem de materiais de resíduos municipais, frequentemente feita por meio de separação para recuperação de materiais em unidades individuais ou especialmente desenhadas pra esta finalidade, unidade de reciclagem industrial *in-loco* e reciclagem por estabelecimentos comerciais.

A reciclagem contribui com a diminuição da poluição, prolonga a vida útil de aterros sanitários, gera empregos para população não qualificada, melhora a qualidade de vida da população e valoriza a limpeza pública. [2]

O método de redução da geração do resíduo vem sido implantado como um meio de minimizar a degradação da natureza e aumentar o bem estar da sociedade. A reciclagem é uma das maneiras de resolver o problema. Ela é parte de um processo de gerenciamento integrado de resíduos sólidos, que se inicia com a redução na fonte. Em outras palavras, a solução desse problema começa com a minimização da quantidade gerada.

Para se ter um gerenciamento desses resíduos, é necessário um sistema em que a quantidade de resíduos a ser aproveitado dentro de um sistema produtivo ou de consumo seja cada vez maior do que a quantidade a ser disposta. Para isso, existem algumas prioridades[3], a saber: evitar (ou quando não for possível) diminuir a produção de resíduos; reutilizar ou reciclar os resíduos; utilizar a energia presente nestes, inertizá-los e dispô-los corretamente os sem valor.

É importante também saber os efeitos de um produto sobre o meio ambiente. A análise do ciclo de vida (ACV) permite tal análise. Ela avalia os efeitos do produto, processo ou serviço sobre o meio ambiente, ao longo de todas as etapas envolvidas,

desde a concepção mercadológica, planejamento, extração e uso de matérias primas, gasto com energia, transformação industrial, distribuição e transporte, uso, reuso, manutenção e reciclagem até a disposição final.

Esse gerenciamento inclui outras alternativas (além da redução na fonte e reciclagem) como incineração, compostagem e utilização de aterros sanitários. A incineração com recuperação de energia em incineradores com controle de emissão gasosa também é viável em algumas localidades. Já a compostagem é usada para tratar a parte orgânica do resíduo: é um processo de decomposição aeróbica de restos de alimentos em que é possível obter um produto para melhorar as características do solo para agricultura. A última alternativa seria a utilização de aterros sanitários, dotados de tecnologias de controle de poluição que recebem o material que não pode ser incluído em nenhum dos itens acima e ainda tem como vantagem adicional a produção de gás metano, cuja utilização como combustível é maior a cada dia.

Após a separação iniciada nas residências, o material segue para a coleta seletiva, um serviço especializado em coletar o material devidamente separado pela fonte geradora, facilitando assim a reciclagem, pois o material permanece limpo e com maior potencial de reaproveitamento.

A resolução 275 do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA)[4] estabelece um padrão de cores de fácil visualização para a separação do resíduo na coleta seletiva.

Azul: papel e papelão;

Vermelho: plástico;

Verde: vidro;

Amarelo: metal;

Preto: madeira;

Laranja: resíduos perigosos;

Branco: resíduos ambulatoriais e de serviços de saúde;

Roxo: resíduos radioativos;

Marrom: compostos orgânicos;

Cinza: resíduo geral não reciclável ou misturado, ou contaminado não passível de separação.

Um dos problemas encontrados no processo de reciclagem é a contaminação dos materiais que serão reutilizados. Isso ocorre na separação inicial que é feita nas residências quando se misturam produtos que serão destinados à coleta seletiva com a matéria orgânica.

Desse modo, muitos materiais são desperdiçados devido à contaminação e um custo muito alto é gerado para posterior descontaminação. O que muitas vezes inviabiliza o processo como um todo.

Produzir embalagens com um só material facilita sua reciclagem, o que implica em benefício direto ao meio ambiente devido à facilidade de coleta e tratamento além de muitas vezes representar um menor volume descartado.

2.2 A Realidade Brasileira

A literatura [5] mostra que do total de 4,9 milhões de toneladas de embalagens produzidas pela indústria nacional em 1996, 61% foram destinados ao setor alimentício, o restante, 31%, foi para produtos não alimentícios, divididos nos setores de higiene e beleza, lazer e pessoal, limpeza, química e agricultura. Em termos monetários, esses percentuais correspondem a valores de 62% para os produtos alimentícios e 38% para os demais. Vê-se que, o setor alimentício, é um mercado para todas as indústrias que desenvolvam projetos e equipamentos voltados para a embalagem.

No início do século XXI, estima-se que a população do planeta é de 6,2 bilhões de habitantes, gerando mais de 1 bilhão de toneladas de resíduos por ano. Desse total, 80 milhões de toneladas são gerados pelo Brasil. Na Tabela 1 tem-se um comparativo da disposição dos resíduos sólidos urbanos gerados no Brasil nos anos de 1989 e 2000, segundo o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatísticas (IBGE) [6]

Tabela 1: Evolução da destinação de resíduos sólidos urbanos de 1989 e 2000 segundo IBGE.

Destinação Resíduos Sólidos Urbanos	1989	2000
Céu aberto (lixões)	75,41%	21,2%
Rios e outros corpos d'água	0,65%	0,1%
Aterros controlados	12,45%	37%
Aterros sanitários	9,34%	36,2%
Compostagem	1,20%	2,9%
Centro de triagem	0,87%	1,0%
Incineração	0,08%	0,4%
Outros (destinação variada ou não há local fixo)	0,0%	1,2%

Comparativamente entre o ano de 1989 e 2000: (a) houve um aumento de todas as alternativas consideradas sanitária e ecologicamente corretas, entre elas aterros sanitários, compostagem, centro de triagem e incineração, (b) houve um aumento no percentual de resíduos enviados para aterros controlados (isto deve representar a cobertura de antigos lixões - geralmente com terra - que traz avanços, pois dificulta a proliferação de vetores e diminui o mau cheiro. No entanto não há procedimentos anti-poluição necessários para o funcionamento de um aterro sanitário, como manter distância de lençóis freáticos, impermeabilizar o solo antes de receber os resíduos para impedir a infiltração de líquidos no solo e controle de escape de gases gerados no processo de decomposição dos resíduos.

De acordo com o CEMPRE – Compromisso Empresarial para Reciclagem[7] o volume da reciclagem no Brasil cresceu 4% (de 5 milhões de toneladas em 2003 para 5,2 milhões de toneladas em 2004). O Brasil foi recordista mundial pela quarta vez na reciclagem de latas de alumínio para bebidas com 95,7%. Entre os países de desenvolvimento, o Brasil segue em primeiro lugar com reciclagem de Embalagens longa vida e a aplicação de tecnologia Plasma, onde consegue separar o alumínio do plástico presentes nas embalagens, contribui para aumentar os índices nacionais onde o Brasil segue reciclando com 23% enquanto Colômbia segue com 5,6% e em seguida segue Argentina com 3,2%.

Em 2005[8] o Brasil possuía mais de 2000 empresas no setor de reciclagem entre recicladoras, sucateiros, cooperativas e associações e a maioria está concentrada na região sudeste do país. Existem 557 empresas recicladoras de plástico, 60 empresas que operam com metal, 54 empresas que trabalham com

reciclagem de papel e 14 com Embalagens Cartonadas. Vidros, baterias, pneus e pilhas são reciclados por outras 15 empresas.

O preço do material reciclado varia de acordo com o segmento e região. Na Tabela 2 tem-se o preço do material reciclado em algumas regiões brasileiras[9].

Tabela 2: Preço do material reciclado no Brasil
p=prensado; l=limpo; i=inteiro; c=cacos; un=unidade.

***Preço da Tonelada em Real (R\$)**

Preço do Material Reciclável										
	Papelão	Papel Branco	Latas de aço	Alumínio	Vidro Incolor	Vidro Colorido	Plástico Rígido	PET	Plástico filme	Longa Vida
Bahia										
Salvador	150L	150PL	200PL	3600PL	80	40L	700PL	630PL	700PL	-
Distrito Federal										
Brasília	70P	200	170PL	2.800	40L	40L	60	35	27	-
Pernambuco										
Recife	140PL	220L	140L	2800L	20L	25L	450	700P	350L	-
Paraná										
Araucária	-	-	190	3500	-	-	250	500	700	50
Londrina	190L	350L	180L	4400L	60L	40L	650PL	600PL	500PL	100PL
Rio de Janeiro										
Rio de Janeiro	200PL	400PL	170PL	2800L	80L	50L	60PL	500P	300PL	30PL
Rio Grande do Sul										
Farroupilha	190PL	400PL	150PL	1700PL	150L	50L	300PL	550PL	350PL	100PL
São Paulo										
Bauru	140PL	300L	210L	-	80L	80L	700PL	520PL	450PL	110PL
Campinas	150L	300L	250L	3900L	100L	100L	800L	500P	700P	260P
Ribeirão Preto	170PL	200PL	120P	3000PL	-	-	150PL	450PL	400PL	700P
Santos	160	250	-	2800	70	70	650	460	650	-
São Bernardo	290PL	530PL	-	3300PL	120	60	700P	650P	450P	160P
São José dos Campos	200PL	150	-	3000PL	120L	120L	520PL	650PL	300PL	160PL

2.3 Embalagens

A embalagem se tornou item fundamental da vida de qualquer pessoa e principalmente das atividades de qualquer empresa.

O desenvolvimento da embalagem acompanhou o desenvolvimento humano, da necessidade inicial do homem de armazenar água e alimentos em algum recipiente, visando à sobrevivência própria, até o início das atividades comerciais, e disseminação do uso das embalagens.

Dependendo do foco em que está sendo analisado, o conceito de embalagem pode variar. Para um profissional da área de distribuição, por exemplo, a embalagem pode ser classificada como uma forma de proteger o produto durante sua movimentação. Enquanto que para um profissional de marketing a embalagem é muito mais uma forma de apresentar o produto, visando atrair os clientes e aumentar as vendas, do que uma forma de protegê-lo [10].

Um conceito mais abrangente proposto por Moura e Banzato [11] faz referência à embalagem como: “Conjunto de artes, ciências e técnicas utilizadas na preparação das mercadorias, com o objetivo de criar as melhores condições para seu transporte, armazenagem, distribuição, venda e consumo, ou alternativamente, um meio de assegurar a entrega de um produto numa condição razoável ao menor custo global”. Quanto à classificação, a mais referenciada é a que classifica de acordo com as funções em primária, secundária, terciária, quaternária e de quinto nível.

a) Primária: é a embalagem que está em contato com o produto, que o contém. Exemplo: vidro de pepino, caixa de leite, lata de leite condensado.

b) Secundária: é aquela que protege a embalagem primária. Exemplo: o fundo de papelão, com unidades de caixa de leite envolvidas num plástico. É geralmente a unidade de venda no varejo.

c) Terciária: São as caixas, de madeira, papelão, plástico.

d) Quaternária: São embalagens que facilitam a movimentação e a armazenagem, qualquer tipo de contenedor. Exemplo: Contêiner

e) Embalagem de Quinto nível: é a embalagem containerizada, ou embalagens especiais para envio a longa distância.

Outra classificação proposta por Bowershox e Closs [12] classifica as embalagens em dois tipos: embalagem para o consumidor, com ênfase em marketing, e embalagem industrial, com ênfase na logística.

Segundo Hanlon [13], materiais de embalagens como o plástico, são versáteis e de boa aparência, entretanto não substituem em todas as situações as outras matérias, como papel e o papelão ondulado. Esses últimos são materiais mais econômicos e ainda são os mais utilizados na fabricação da maioria das caixas. Os metais possuem elevada resistência e rigidez que são necessárias em certas aplicações especiais, pois possuem o inconveniente do alto peso somente a folha de alumínio provê absoluta barreira nas embalagens flexíveis. As garrafas e potes de vidro são quase sempre os preferidos na escolha, em lugar daqueles de material plástico e seria um erro assumir que eles são inteiramente substituídos por matérias sintéticos.

Para determinados produtos, a utilização isolada dos diferentes materiais de embalagens, tais como, papel, papelão ondulado, cartão, madeira, plásticos, metais (alumínio e aço) e vidro, não é suficiente. Para atender todas as funções da embalagem, a custo mínimo e que resulte num produto competitivo, surgiram os materiais combinados ou compósitos.

Na Tabela 3 apresenta como cada material pode contribuir nas propriedades das estruturas multicamadas.

Tabela 3: Principais características de alguns substratos usados em estruturas combinadas [14, 15, 16]

<i>Substrato</i>	<i>Característica</i>
Papel comum	Baixo custo, rigidez, resistência mecânica.
Papel glassine	Barreira à passagem de gorduras e aroma
Alumínio	Boa aparência, barreira à luz, baixa permeabilidade a gases e ao vapor de água.
Celofane	Transparência, brilho, rigidez e boa usinabilidade.
Polietileno	Baixo custo, baixa taxa de permeabilidade ao vapor de água, termossoldável.
Polipropileno	Rigidez, baixa taxa de permeabilidade ao vapor de água, brilho
PVC	Termossoldável, boa resistência à gorduras
PVDC (Saran) [17]	Barreira a umidade, oxigênio, sabor e aroma, transparência e custo baixo.
EVOH [18]	Barreira ao oxigênio, boa propriedade ópticas e térmicas e resistência a óleos e solventes orgânicos.
PET[19]	Resistência mecânica (impacto) e química resistente às variações de temperatura, barreira à gases e odores, brilho e boa transparência.

2.4 Embalagens cartonadas

A Embalagem cartonada está presente no Brasil desde 1957, mas a primeira fábrica inaugurada foi em 1978 em Monte Mor pela empresa Tetrapak. [20] A embalagem possui a função de envasar alimentos e possui uma estrutura composta por multicamadas que fornece a proteção aos alimentos nela armazenados. Ela é formada por três materiais: papel, plástico e alumínio, distribuídos em seis camadas conforme Figura 1 [21].

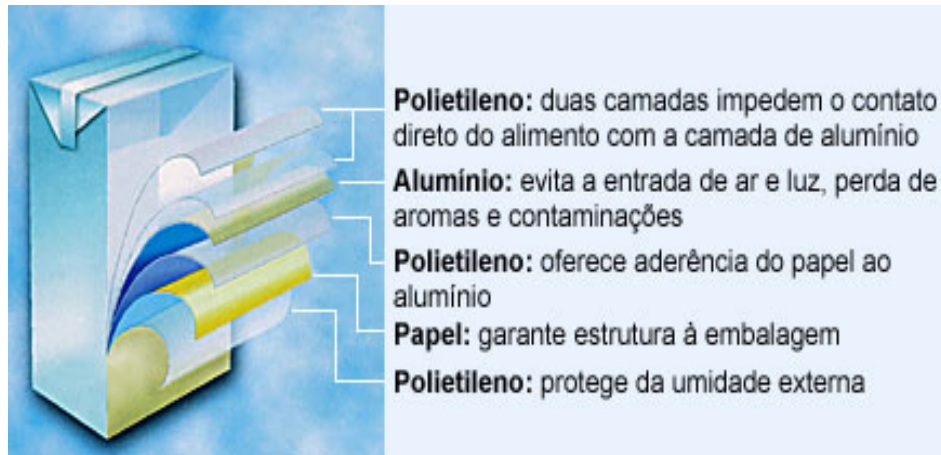


Figura 1: Estrutura da Embalagem cartonada

O papel corresponde a 75% do peso da embalagem são produzidas a partir de fibras de celulose das madeiras de Pinus. O papel utilizado nas embalagens é o papel cartão duplex com uma camada branca e suas principais funções são dar suporte mecânico à embalagem e receber a impressão.

NEVES [22] cita que as principais propriedades do cartão, as quais devem ser controladas para atender os requisitos de uma embalagem ao produto, são: brilho e alvura (ópticas); rigidez e resistências à tração (índice de tração), ao arrebentamento (índice de arrebentamento), à dobras e à de laminação (mecânicas); e, de absorção de água, lisura, capacidade de impressão e resistência ao arrancamento superficial da fibra (desempenho gráfico).

O polietileno de baixa densidade (PEBD) é o polímero usado e corresponde a 20% da embalagem em peso. Presente em quatro camadas na embalagem, suas funções são isolar o papel da umidade, impedir o contato do alumínio com o alimento e servir como elemento de adesão dos outros materiais presentes na estrutura (papel e alumínio).

As principais propriedades que devem ser consideradas nas resinas de polietileno são: densidade, índice de fluidez, distribuição do peso molecular. Durante a polimerização do polietileno, muitas cadeias poliméricas de diferentes comprimentos e pesos moleculares são produzidos. A propriedade que está relacionada com a massa molar e a viscosidade é o índice de fluidez do polímero.

Resinas para filmes têm índices entre 0,2 a 7,0 g/10 minutos, sendo que alguns filmes de alta densidade tem esses índices inferiores a 0,05g/10 minutos. [23]

O alumínio corresponde a 5% da embalagem e sua principal função é evitar a passagem de oxigênio, luz e microorganismos que possam entrar em contato com o alimento.

As folhas de alumínio usadas em embalagens que apresentam espessuras acima de 18 μm são impermeáveis à umidade (vapor de água) e gases. A resistência química a solventes e a gordura é boa, mas a resistência à água é regular. A resistência a ácidos, exceto a ácidos muito fracos, e aos álcalis é pobre, a menos que ele seja protegido com um verniz ou cera. O alumínio dessa forma não é afetado pela luz ou por temperaturas abaixo de 288°C. Essas folhas possuem resistência à tração relativamente baixa, entretanto, em temperaturas muito baixas, a resistência mecânica melhora o que as tornam convenientes para as embalagens que ficam em ambientes frigoríficos [24].

Dessa forma, as camadas estão dispostas da seguinte forma: de fora pra dentro; polietileno, papel, polietileno, alumínio, polietileno e finalmente, a camada mais interna, outra de polietileno conforme Figura 1.

2.5 Compósitos

Por definição, um compósito é um material multi-fase que apresente uma proporção significativa das propriedades dos constituintes de modo que a melhor combinação das propriedades é obtida [25]. Assim, um material formado por um polímero e um metal ou por um polímero e uma cerâmica, ou ainda pela composição de um metal com uma cerâmica com um polímero é um compósito.

Muitos materiais compósitos são formados por apenas duas fases; uma delas é a chamada matriz que é a fase contínua e que rodeia a outra fase, chamada de fase dispersa. As propriedades dos compósitos são: função das propriedades das fases constituintes, suas quantidades relativas e da geometria da fase dispersa (forma e tamanho das partículas, sua distribuição e orientação). Uma estrutura simples para a classificação de materiais compósitos é mostrada na Figura 2 que consiste de três principais divisões – compósitos reforçados por partículas, compósitos reforçados por fibras e compósitos estruturais.

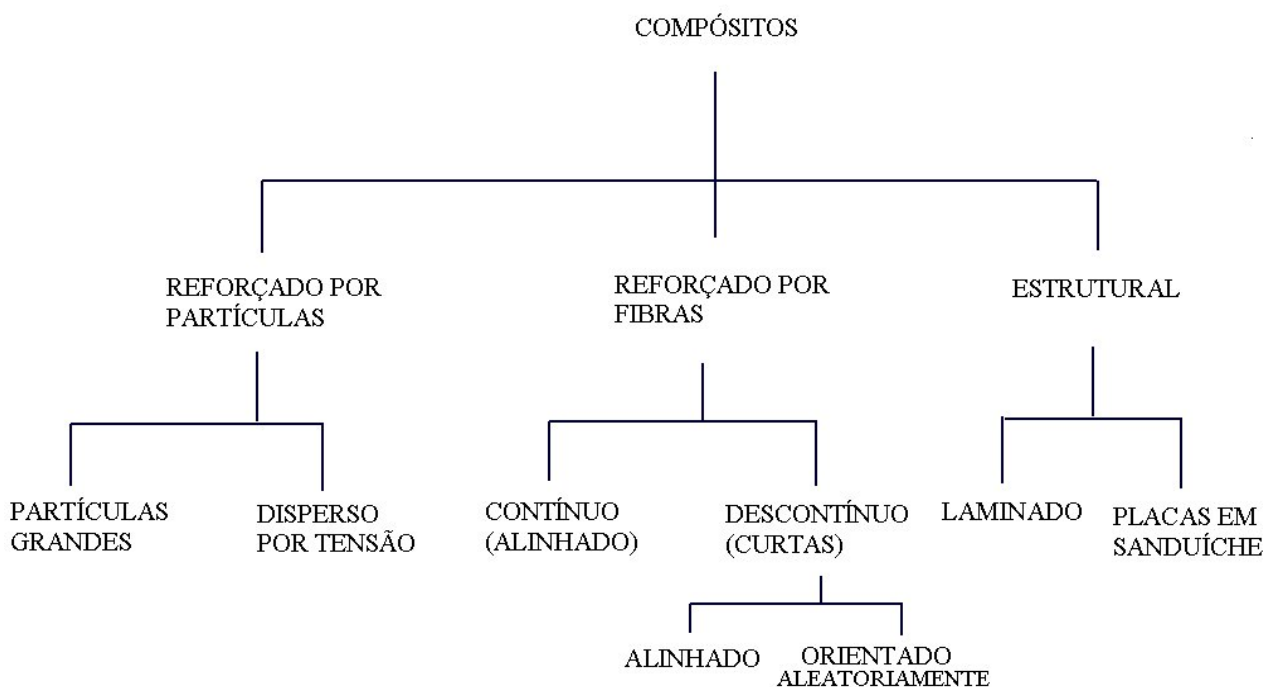


Figura 2: Esquema de classificação dos Compósitos

2.6 Compósitos reforçados com partículas

Os compósitos reforçados com partículas[26] grandes e os compósitos reforçados por dispersão são as duas subclassificações dos compósitos reforçados com partículas. A distinção entre essas subclassificações está baseada no mecanismo do reforço ou aumento de resistência. O termo “grande” é usado para indicar que as interações partícula-matriz não podem ser tratadas no nível ou ponto de vista atômico ou molecular; em vez disso é empregada a mecânica do contínuo. Para a maioria desses compósitos, a fase particulada é mais dura e mais rígida do que a matriz. Essas partículas de reforço tendem a restringir o movimento da fase matriz na vizinhança de cada partícula. Essencialmente, a matriz transfere parte da tensão aplicada às partículas, as quais suportam uma fração da carga. O grau de reforço ou melhoria do comportamento mecânico depende de uma ligação forte na interface matriz-partícula.

No caso dos compósitos que têm a sua resistência aumentada por dispersão, as partículas são, em geral, muito menores, com diâmetros entre 0,01 e 0,1 μm (10 e 100 nm). As interações partícula-matriz que levam ao aumento de resistência ocorrem no nível atômico ou no nível molecular. O mecanismo de aumento de resistência é semelhante àquele para o processo de endurecimento por precipitação. Enquanto a matriz suporta a maior parte de uma carga que é aplicada, as pequenas partículas dispersas evitam ou dificultam o movimento de discordâncias. Dessa forma, a deformação plástica e restringida de modo a tal que o limite de escoamento e o limite de resistência a tração, bem como a dureza são melhorados.

2.7 Compósitos Reforçados com Fibras

Tecnologicamente, os compósitos mais importantes são aqueles em que a fase dispersa encontra-se na forma de uma fibra [27]. Os objetivos de projeto dos compósitos reforçados com fibras incluem com frequência resistência e/ou rigidez alta em relação ao seu peso. Essas características são expressas em termos dos parâmetros resistência específica e módulo específico, os quais correspondem, respectivamente, às razões do limite de resistência à tração em relação à densidade relativa e ao módulo de elasticidade em relação à densidade relativa.

Os compósitos reforçados com fibras são subclassificados de acordo com o comprimento da fibra [28]. No caso de fibras curtas, estas não possuem comprimento mínimo para produzir o efeito de reforço no compósito.

2.8 Propriedades mecânicas de Compósitos Poliméricos e Ensaio Normalizados

Até o presente, quase todo o desenvolvimento de materiais compósitos teve como objetivo as aplicações estruturais. Devido à sua complexa microestrutura, estes materiais são de difícil caracterização. Na avaliação das propriedades das propriedades mecânicas, deve-se levar em conta a complexidade da interação mecânica entre o reforço e a matriz [29].

No ensaio de tração são determinadas as propriedades de resistência à tração uniaxial, módulo de elasticidade, alongamento e coeficiente de Poisson. A resistência à tração é avaliada pela carga aplicada no material por unidade de área, no momento da ruptura. O alongamento representa o aumento percentual do comprimento da peça sob tração, no momento da ruptura.

O módulo de elasticidade é medido pela razão entre a tensão e a deformação, dentro do regime elástico, onde a deformação é totalmente reversível e proporcional à tensão. O coeficiente de Poisson é definido como a razão negativa entre a deformação transversal e a correspondente deformação longitudinal de um corpo-de-prova sob tensão uniaxial, abaixo do limite de proporcionalidade do material.

As normas ASTM D638 e D3039 descrevem o ensaio de tração. A norma ASTM D638 é mais abrangente enquanto que a norma ASTM D3039 é indicada para compósitos laminados reforçados com fibras de alto módulo [30, 31].

Das normas acima citadas, algumas são exclusivas para materiais compósitos, outras são destinadas aos materiais poliméricos, podendo ser adaptadas aos materiais compósitos. As normas exclusivas aos materiais compósitos foram elaboradas, em sua maioria, visando os compostos tradicionalmente utilizados, com fibras de vidro e carbono. [32].

2.9 Processos de Fabricação da Embalagem Cartonada

Para a fabricação das embalagens cartonadas, as bobinas de papel já impresso são intercaladas com o filme de polietileno e a folha de alumínio. Este sanduíche passa pelo processo de laminação a quente, que não utiliza adição de outra resina ou cola, pois o polietileno ao fundir, faz a aderência entre as camadas de papel e alumínio. Em seguida, o sanduíche é cortado e

acondicionado em bobinas para posterior processamento nos produtores de alimentos. Nesta etapa as bobinas são colocadas nas máquinas de envase e formam a embalagem como é vista (em forma de “caixinha”) e ao mesmo tempo, acontece o acondicionamento do produto.

2.10. Processos de Reciclagem de Embalagens Cartonadas

Para que a reciclagem da embalagem seja possível, é necessário que se faça a separação das diversas camadas de materiais que a compõe. O principal processo utilizado para essa finalidade é o processo Hidrapulper [33, 34].

2.10.1 Reciclagem pelo Processo Hidrapulper

Este processo consiste em separar o papel dos outros dois componentes presentes na embalagem, o polietileno e o alumínio.

A embalagem inteira é adicionada a um Hidrapulper (um rotor para desagregação onde se usa a água para a separação das fibras) de alta consistência (onde promovem uma degradação das fibras mais brandas, de 10 a 15% de consistência) e baixa consistência (a degradação das fibras é mais acentuada, abaixo de 6% de consistência) e sem adição de qualquer composto químico ou calor para acelerar a hidratação das fibras. O tempo de agitação é em torno de trinta e cinco minutos, períodos maiores podem prejudicar a qualidade das fibras recuperadas.

Após a hidratação, as fibras presentes na embalagem se destacam e ficam suspensas, possibilitando a retirada por bombeamento pela parte inferior do hidrapulper, passando por uma placa perfurada que evita a passagem do polietileno e do alumínio. Estes são retirados pela lateral por gravidade e logo em seguida, o polietileno com o alumínio passam por um lavador de plásticos que tem o objetivo de extrair o residual de fibras.

Após as fibras retornarem ao processo e em seguida lavadas e purificadas, elas são utilizadas para a produção de diversos tipos de produtos como papelão ondulado, papel cartão, embalagem para ovos, palmilhas para sapatos, papel toalha e papel higiênico.

O alumínio e o polietileno são acondicionados em fardos e encaminhados recicladores de plásticos.

O polietileno contendo alumínio passará por um novo processo de limpeza [35] onde é feita em equipamento contendo rotor não cortante operando acima de 1000 rpm onde sua função é de eliminar por completo as fibras que possam ainda estar presente. A separação das fibras é feita em peneira no interior do lavador que é composto por dois compartimentos. No compartimento interior é retido o polietileno com alumínio e no exterior a polpa de papel. É feita a injeção de água tangencialmente às paredes do lavador e em seguida são centrifugados e secos.

Após a purificação do polietileno com alumínio, a mistura passa por um processo de aglutinação que consiste em um tratamento termo-mecânico onde o plástico é agitado à seco por um rotor até atingir a temperatura de plastificação, quando é aplicado um choque térmico através da adição de água em pequena quantidade. O objetivo deste processo é aumentar a densidade do material para facilitar sua passagem na extrusora e retirar resíduo de umidade. A retirada de umidade pode ser otimizada instalando um exaustor na saída dos gases do aglutinador. O material aglutinado deve ter baixa umidade para eliminar possíveis bolhas de ar durante a extrusão. Este processo permite que o alumínio seja disperso, garantindo um material homogêneo.

Após o processo de aglutinação, o material passará por extrusão onde será obtido o grão, matéria-prima para injeção ou laminação de peças plásticas. A extrusão consiste na passagem do material por um equipamento em que o material será aquecido atingindo o ponto de plasticidade, sendo posterior cortado em grãos (grãos). As peças produzidas através da reciclagem do alumínio/polietileno podem ser: vassouras, cestos de lixo, cabides, réguas, canetas, placas e telhas para a construção civil.

2.10.1.1 Processo via Plasma

A tecnologia de plasma [36] permite a separação das camadas de polietileno e alumínio. O papel já separado da embalagem é reutilizado pelas empresas recicladoras de papel. O sistema aquece a mistura de polietileno e alumínio E com o processo, a cadeia do polietileno é “quebrada” em cadeias menores de carbono e hidrogênio e é transformado em parafina. O alumínio, recuperado em forma de lingotes é transformado em novas folhas de alumínio usadas na fabricação de Embalagens Cartonadas e, assim, fecham o ciclo de reciclagem do material.

Esse processo tem a capacidade de processar 8 mil toneladas por ano de plástico e alumínio, o que equivale à reciclagem de 32 mil toneladas de embalagens cartonadas. O processamento é feito na ausência de oxigênio, sem queimas, e com eficiência energética próxima de 90%.

2.10.2 Reciclagem por Compressão Térmica

Nesse processo [37] as embalagens são cortadas, lavadas, trituradas e espalhadas em camadas numa prensa a 170°C. Posteriormente o calor funde o polietileno que plastifica a fibra já comprimida, bem como as aparas de alumínio, de forma a dar origem a uma placa com elasticidade. Esta placa é submetida a um esfriamento, transformando-se assim num aglomerado resistente com uma superfície impermeável e brilhante. Esses produtos podem ser moldados dando origem a móveis como cadeira e mesas.

2.10.3 Placas e Telhas

O princípio do processo de fabricação das placas e telhas [38] é o mesmo da reciclagem por compressão térmica, pois também consiste na fusão do material sob pressão e posterior resfriamento. Primeiramente o polietileno contendo alumínio é triturado em pequenos fragmentos usando-se moinhos de facas. A redução do tamanho do material facilita sua fusão e proporciona maior homogeneidade ao produto final.

Após trituração, o material é disposto em formas, para formatação das chapas. Essas formas repletas de polietileno e alumínio são introduzidas em prensas utilizadas para a produção de placas de compensado.

Nesse processo, as prensas são modificadas visando permitir a entrada do material, já que possui densidade aparente menor que a madeira. No processo de fabricação das placas e telhas com polietileno e alumínio, a temperatura de trabalho é de aproximadamente 180°C, fazendo-se necessário que o sistema de aquecimento seja alterado, para que atinja temperaturas entre 160°C e 200°C.

Após a fusão do polietileno, as placas passam por processo de resfriamento, para endurecimento das camadas plásticas. As espessuras das placas podem variar de 4 a 50 mm. Espessuras maiores podem ser obtidas fazendo-se a repsensagem de diversas placas pré-formadas, colocando-as umas sobre as outras.

A produção de telhas segue o mesmo processo da fabricação de placas, no entanto, as placas, ainda quentes, são introduzidas num processo de prensagem a frio com formas onduladas em que o material adquire a geometria de telhas ao resfriar. O tempo de resfriamento é da ordem de 5 a 10 minutos, dependendo da espessura do insumo produzido.

2.11. Outros compósitos de fibras com polímeros

Diversos aspectos dos compósitos formados por fibras naturais fazem parte do grupo dos biocompósitos: que por sua vez são formados por:

- a) Uma matriz composta por um biopolímero, ou
- b) Fibras vegetais naturais ou processadas ou
- c) Ambos os componentes.

As pesquisas são focadas nos seguintes aspectos:

- a) Pesquisa e desenvolvimento de novos polímeros biodegradáveis,
- b) Pesquisa e desenvolvimento da utilização de fibras naturais,
- c) Desenvolvimento de métodos analíticos que permitam medir a biodegradabilidade dos compósitos e
- d) Estudos técnico-econômicos e de marketing para os novos compósitos.

Para os compósitos a transferência de esforços da matriz para a fibra acontece por meio da interface. Antes de melhorar a interação da fibra com a matriz é preciso conhecer a magnitude desta interação. Nardin [39] estudou detalhadamente as interfaces fibra-matriz de diversos compósitos. Tal estudo discutiu os fenômenos de adesão, os tipos de interações que favorecem a adesão e os mecanismos de adesão (modelo de ancoragem mecânica, a teoria de interação elétrica, a teoria das camadas de coesão fraca e o conceito de interface, a teoria termodinâmica da adesão, a teoria da difusão e da interdifusão, e a teoria da ligação química).

Além dos aspectos anteriormente citados, a caracterização mecânica da interface fibra-matriz, em como o papel específico das fibras vegetais nos compósitos foram discutidos.

Busnel [40] avaliou a influência dos tratamentos químicos nas propriedades superficiais de fibras de linho. Após tratamentos em meios de hidróxido de sódio, de ácido fórmico, e de hidróxido de sódio com posterior tratamento em meio de anidrido acético, compósitos de resina poliéster termofixo com uma fibra única forma preparados para avaliação mecânica por meio de ensaios de cisalhamento na interface matriz-fibra. Uma caracterização adicional foi feita com espectroscopia no infravermelho e microscopia de força atômica. Os resultados mecânicos mostraram que os tratamentos químicos propostos para a fibra de linho provocaram redução da tensão de ruptura e de alongamento na ruptura para o compósito fibra de linho-resina de poliéster termofixo. Além das alterações superficiais os tratamentos provocaram também alterações volumétricas na fibra de linho.

Na linha das alterações superficiais das fibras, Sebe [41] trabalhou novos métodos de funcionalização com organossilanos. A caracterização das fibras tratadas foi feita por meio de espectroscopia de infravermelho e ressonância magnética nuclear no estado sólido, mostrando que foi possível introduzir novos grupos funcionais na superfície das fibras ligno-celulósicas a partir de reagentes organossilanos variados.

Bréard [42] realizou um estudo comparativo das propriedades de compósitos poliéster-fibra de vidro e poliéster-fibra de linho. A comparação entre os compósitos mostrou que as pré-formas de fibra de linho são menos compressíveis e menos permeáveis. Os ensaios de tração dos corpos-de-prova dos dois tipos de compósitos mostram que, na mesma taxa volumétrica de fibras, a rigidez específica dos compósitos reforçados por fibras de linho ou de vidro é a mesma em ambos os casos, tornando possível substituir a fibra de vidro pela fibra de linho no escopo do estudo.

De acordo com Gouanvé [43] que estudou o efeito de tratamentos plasma frios após autoclavagem para fibras de linho em compósitos com poliéster como matriz polimérica. Tais tratamentos forma aplicados com o objetivo de reduzir a permeabilidade do compósito à água. A autoclavagem visou preparar as fibras de linho para o tratamento plasma frio em CF_4 .

O estudo permitiu concluir que a autoclavagem seguida do tratamento plasma a frio com CF_4 reduziu a permeabilidade do compósito à água.

Segundo NECHWATAL [44] a incorporação de fibras curtas de celulose (flax, lyocell e viscose) num composto de borracha (mistura de borracha natural com SBR) fizeram-na mais rígida e mais dura, porém, a rigidez ficou abaixo do esperado quando comparando com a rigidez teórica do compósito por conta da agressividade do processo de incorporação.

GROZDANOV [45], utilizou papel reciclado incorporado no PP homopolímero graftizado com anidrido maleico facilita o seu processo de cristalização, segundo análise por DSC.

COLOMB [46], as partículas de pneus moídos foram tratadas com: ácido sulfúrico concentrado, cloração e silano a 2%. Os melhores resultados foram obtidos em ordem crescente (considerando teores de máximo de 10% de pneu) silano a 2%, ácido sulfúrico sem tratamento e com cloração. Vale ressaltar que o desempenho do compósito está intimamente relacionado com o mecanismo de adesão (físico ou químico) entre a matriz polimérica e as partículas de reforço/carga. Acima de 20% de teor de pneu acontece um decaimento das propriedades mecânicas do compósito.

De acordo com MURATHAN [47] preparou-se um compósito de embalagem cartonada com ligante a base de U-F (uréia-formaldeído) exibindo melhores propriedades físicas do que ligantes a base de cola de PVA (acetato de polivinil). Esses materiais podem ser usados como proteção de calor contando com a alta condutividade térmica do alumínio. Esses materiais podem ser usados atrás de radiadores ou aquecedores elétricos podendo evitar a perda de calor. Esse novo material não é apropriado para o uso de ambientes externos por causa da alta umidade.

NISHINO [48] preparou um compósito de celulose sem usar uma matriz por dissolução parcial de superfícies da fibra. Para otimizar as condições de imersão da fibra celulósica no solvente, as fibras, foram parcialmente dissolvidas e uniformizadas pela compressão seguida pela secagem. Este compósito mostrou excelente propriedade térmica e mecânica. Além do que, este compósito é um recurso sustentável e é biodegradável após o uso.

Um compósito formado por vários tipos de celulose gerados por uma matriz baseada em celulose e reforço são adicionados aos derivados da biomassa de plantas e esse composto tem melhorado as propriedades interfaciais em comparação com os compósitos baseados nos termoplásticos que são compostos de fibras hidrofílicas e matriz hidrofóbica. Segundo DUCHEMIN

[49] O estudo relatou a rota de fabricação utilizada para produzir os compósitos baseados em celulose (em fibras de madeira de *Pinus radiata*). O sistema DMA/LiCl foi utilizado para dissolver celulose originária da polpa de madeira.

Foi utilizada difração de raios - X de grande ângulo para monitorar a regeneração da matriz e os resultados sugerem que a forma cristalina final da celulose regenerada é alcançada apenas no último estágio da regeneração que tem uma importante aplicação para o processamento dos compósitos celulósicos. O compósito final é formado de uma matriz de celulose regenerada reforçada com fibras de madeira. As propriedades estáticas e dinâmicas do compósito de celulose resultante foram medidas e comparadas com outros eco-compositos.

Segundo NEAGU [50] testou-se diferentes fibras de madeira e sua adequação para uso como reforço em matriz polimérica termofixa de um compósito de número de fibras de madeira mole/dura branqueadas/não branqueadas produzidas industrialmente ou em laboratório. Uma folha dinâmica primária foi utilizada para obter retalhos com várias orientações de fibra. Os compósitos foram preparados pelo processo de moldagem por transferência de resina com uma resina éster epóxi vinílica. A distribuição da orientação das fibras foi determinada experimentalmente por meio de análise de imagens escaneadas dos retalhos de camadas de fibras aderidas a uma fita adesiva.

As densidades dos materiais, da matriz, das fibras, bem como do compósito como fração de massa foram também determinadas. Um modelo micromecânico combinado com a mecânica clássica de laminados foi utilizado para relacionar as propriedades elásticas dos compósitos com as propriedades elásticas das fibras. Este método fornece dados quantitativos de engenharia para avaliar o potencial de diferentes fibras como reforço de enrijecimento. Os resultados mostraram que as fibras não branqueadas são mais que as fibras branqueadas para uso como reforços de enrijecimento e as fibras de madeiras duras tem maior rigidez que as fibras de madeira mole correspondentes.

O efeito dos tratamentos kraft, sulfito, e de obtenção da polpa mecânica também foram avaliados. Os resultados indicam que o processo rústico de desfibrar pode ser usado, pois ele não danifica a estrutura da parede da célula e assim a rigidez inerente das fibras nativas pode ser mantida.

PEIJS [51] afirma que os materiais compósitos têm sido cada vez mais usados na indústria automotiva e são substitutos dos metais e também de polímeros não reforçados. Os motivos

importantes incluem desempenho mecânico melhorado e estabilidade dimensional. Contudo, sob a luz da demanda crescente na reciclagem de materiais automotivos, o uso de pelo menos dois constituintes (matriz polimérica e a fibra) é problemático. Uma visão interessante é utilizar tanto a matriz polimérica como a fibra composta por polímeros, e até mesmo do mesmo polímero.

Neste caminho, o componente inteiro poderá ser convenientemente reciclado, sem a necessidade de procedimentos complicados para separação dos componentes. Esta visão foi primeiramente levada a termo com a combinação de fibras de PE com uma matriz de PEBD. Capacetes foram produzidos utilizando a baixa temperatura de fusão do PEBD se comparado com as fibras de PE. Na Leeds University, materiais interessantes também foram preparados pela fusão de fibras de PE juntas por meio de uma fusão parcial da superfície das fibras, pois demanda um controle de temperatura bastante preciso.

Em outro projeto na Queen Mary College, a fita de polipropileno foi combinada com matriz de PP onde a fita foi estirada e também revestida com um copolímero de PP de baixo ponto de fusão. Isto fornece uma janela de processamento suficientemente larga para as tecnologias de aplicação industrial. Fibras fortes de celulose são combinadas numa matriz celulósica. Neste caminho, os compósitos são biodegradáveis de alto desempenho e podem ser produzidos a partir de fontes renováveis.

Fibras naturais possuem uma boa capacidade de reforço quando são compostas com polímeros. Essas fibras são relativamente de baixo custo, originárias de fontes renováveis, não geram quantidade adicional de CO₂ quando queimadas (a quantidade de CO₂ formada na combustão é inferior ao que foi consumido durante o crescimento do vegetal), biodegradáveis e exibem valores favoráveis de resistência e módulos específicos. Segundo BOGOEVA –GACEVA [52] os polímeros termoplásticos, têm um tempo de ciclo curto bem como a reprocessabilidade.

Fibras renováveis naturais e polímeros recicláveis termoplásticos fornecem uma qualidade ecológica atrativa para os compósitos resultantes reforçados com fibras naturais. A contribuição deste trabalho é analisar o comportamento de cristalização do PP em compósitos de PP/fibras de Kenaf, foi preparado usando o PP homopolímero e o PP modificado com anidrido maleico (PPm). O comportamento de fusão e cristalização dos compósitos foi analisado por DSC, no regime dinâmico (taxa de aquecimento 10K/min, taxas de resfriamento: 5, 10, 15, 20, 40 K/min) e por POM (Polioximetileno) em regime isotérmico.

Os resultados obtidos para os sistemas modelo foram comparados com aqueles para os compósitos de PP/fibra de Kenaf, produzidos por prensagem a quente. Verificou-se que a superfície da fibra Kenaf atua como um agente nucleante durante a cristalização do PP, levando a temperatura do pico de cristalização para valores mais altos (regime dinâmico) Taxas mais altas de cristalização e de crescimento de esferulito foram obtidos para os compósitos de PPM/kenaf. Aplicando-se o modelo para mecanismos de nucleação heterogênea, os parâmetros de energia para esses sistemas foram calculados, baseados nos dados de cinética de DSC. A influência das fibras Kenaf na cinética de cristalização foi posteriormente comparada com resultados prévios de compósitos de PP e fibra de vidro ou fibra de carbono.

As propriedades mecânicas de compósitos de fibra natural com PEBD são consideravelmente mais baixas quando comparadas com o polímero puro. Por outro lado, o Módulo de Young aumenta devido a alta dureza das fibras de celulose e lignina. Isso deve ser notado que a dureza de blendas com alta concentração de carga é acompanhada por alta fragilidade desses materiais e que na verdade, minimizam a elongação. Os valores das propriedades mecânicas foram aceitáveis em relação à baixa concentração de carga (acima de 20 phr), desprezando o resíduo de eucaliptos não tratados, segundo GEORGOPOULOS [53],

Esta carga ganhou melhores resultados com o compósito plástico especificamente de concentração de 30 phr. A resistência à tração deste compósito é boa quando comparado com o polímero sem carga, o Modulo de Young é significativamente maior, entretanto esta elongação é reduzida em comparação com o plástico sem carga. O aumento das características de resistência ao desgaste e a dureza da maioria dos compósitos foram esperados. Contudo, modificações das fibras apropriadas como métodos químicos e físicos antes da incorporação nas matrizes poliméricas são recomendáveis a fim de otimizar as características interfaciais e realçar as ligações no qual poderia aumentar as propriedades finais.

Segundo JACOB [54] as características de processabilidade e as propriedades mecânicas da fibra híbrida de sisal e de palmeira reforçadas por compósito de borracha natural têm sido estudados com a função de fibras de tratamento e carga. As propriedades mecânicas do compósito na direção longitudinal são superiores a aquelas na direção transversal. A adição de sisal e fibras de palmeiras conduziu para o aumento da medida de tensão e resistência ao rasgo, mas aumentou o módulo. A extensão de adesivo entre a fibra e a matriz de borracha aumentou com o tratamento

álcali da fibra. Das propriedades mecânicas de fibras tratadas com álcali exibiram melhores propriedades do que os compósitos não tratados.

Processos de caracterização foram encontrados independentes da carga de fibra e modificação da superfície da fibra. Os estudos revelaram que o compósito contendo agentes ligantes e tratados com álcali, mostrou alta densidade de ligação cruzada e melhor adesão, indicando também que a presença de fibras curtas restringe a entrada do solvente.

Segundo KARMARKAR [55], os efeitos da incorporação de fibra de madeira de eucaliptos com ou sem um agente compatibilizante no processo e propriedade de compósito de PP foram estudados onde um novo compatibilizador foi preparado por enxerto de m-TMI (m-isopropenil dimetilbenzeno de isocianato) e polipropileno usando o processo de extrusão. Análise por FTIR evidenciou a presença de grupos NCO de m-TMI-g-PP ligado covalentemente por grupos de hidroxila de fibras de madeira.

Testes de propriedades mecânicas, tensão, flexão e impacto, demonstraram que as fibras usadas agem como agentes de efeitos reforçantes por PP. Adicionando fibras de madeira, em altos níveis, resultou maior rigidez e tenacidade, mas com baixa energia de impacto e porcentagem de alongação quando comparado com a matriz polimérica. Com a fibra de madeira contendo nesse compósito, aumentou de 10 para 50wt.%, a tensão de resistência ao rasgo aumentou linearmente de 30,5 para 44,2 N/mm² representando um aumento de 45%, enquanto o módulo de tensão aumentou 200%. A tensão de flexão exibiu um aumento de 85% de 49,8 para 91,9 N/mm². O aumento das propriedades mecânicas demonstraram que m-TMI-g-PP é um efeito compatibilizador de compósito de fibra de madeira e polipropileno.

DOAN [56] identificou os efeitos de agentes compatibilizantes em interfaces e carga de propriedade mecânica de compósito de fibra de juta e PP sendo essencial para o entendimento de macro-mecânica responsável para a fratura interfacial. Em adição, foram estudados os efeitos de resistência ao rasgo e umidade da fibra de juta. Com a adição de 2wt% MAHgPP (anidrido maleico enxertado com Polipropileno) com matriz de PP podem significativamente aumentar a força de adesão com fibra de juta e as propriedades mecânicas do compósito.

O nível de PP também possui significativamente efeitos de um crescimento de agentes compatibilizantes do compósito de fibra de juta e PP por MAHgPP. PP com menos taxa de índice de fluidez aumentam as propriedades mecânicas para uma ótima extensão do que baixo peso

molecular. O módulo de tensão do compósito de juta/PP aumenta com o aumento da quantidade de fibra e mostra menos sensibilidade da variação de adesão da interface. A resistência à tração da fibra na verdade aumenta com o aumento da área da seção transversal numa relação constante, o que é inconsistente com o comportamento estatístico da falha de outros materiais quebradiços onde a probabilidade de defeitos críticos causadores da falha aumenta com o aumento do volume da fibra.

A propriedade intersticial da fibra de juta é proporcional a área da seção transversal associada com a forma circular perfeita. O aumento da resistência ao rasgo ocorre para o compósito juta/PP em condições de umidade, como é atribuída com o aumento de um polímero e resistência de adesão interfacial. A saturação de absorção de unidade da fibra de juta é acima de 10-20wt% pode ser alcançado depois de acondicionamento em ambientes com diferentes unidades relativas.

A fração de volume e o tamanho do bagaço de cana usado foram variados e os resultados mostram que a incorporação de bagaço de cana cortado reduz a capacidade de deformação do polímero EVA e o resultado referente à resistência ao impacto mostrou que é independente do tamanho do bagaço, mas sim, varia com a fração de volume do mesmo. Segundo STAEL [57], a função da fração de volume foi utilizada para mostrar que a performance mecânica do compósito de bagaço com EVA pode ser trabalhada para reproduzir o comportamento das placas de madeira.

ABU-SHARKH [58], incorporou folhas de palmeira ao polipropileno (PP) para formar um material compósito e submeteu-o à ação de raios UV sob condições de intemperismo natural e acelerado. Como resultado, notou-se que o compósito é muito mais estável que o PP sob condições severas de intemperismo natural e acelerado. O estudo avaliou ainda a estabilidade de compósitos que utilizavam PP graftizado com anidrido malêico. Amostras compatibilizadas mostraram-se menos instáveis que as não compatibilizadas devido a baixa estabilidade do PP graftizado. Os estabilizantes Irgastab e Tinuvin mostraram-se eficientes para compósito de fibra de celulose/PP. Contudo, a estabilidade concedida pela presença da fibra no compósito por meio da adesão interfacial resultante da oxidação da matriz polimérica pode ser fonte de redução da resistência mecânica.

Segundo KUMAR [59], a utilização de fibra natural como reforço de compósito termoplástico tem aumentado não somente pelo interesse ecológico, mas também pelo extenso alcance em sua

aplicação. Três tipos de compósitos foram preparados pela mistura de copolímero propileno-etileno (EP) e, 1) fibra de juta tratada com 3% de NaOH, 2) fibra de juta tratada com 17,5% de NaOH e 3) pó de celulose microcristalina comercial usando copolímero EP graftizado com anidrido malêico como compatibilizador.

Os compósitos obtidos foram caracterizados por FTIR, TGA e microscopia eletrônica de varredura. A durabilidade dos compósitos foi avaliada sob radiação policromática ($\lambda \geq 290$ nm) e em diferentes condições de compostagem em diferentes intervalos de tempo. Determinou-se que o tratamento de fibras naturais foi influenciado pelo tempo de utilização do produto final. Os compósitos feitos com celulose microcristalina mostraram melhores propriedades mecânicas bem como melhor foto-resistência. As amostras contendo fibras tratadas com 3% de NaOH exibiram foto-resistência e bio-suscetibilidade mais baixas.

De acordo com HUDA [60], fibras naturais tem substituído tradicionalmente os reforços sintéticos usados na preparação de compósito ambientais. Materiais compósitos também têm substituído matérias convencionais em vários campos devido ao seu fácil processamento. Compósitos de Poli ácido Lático (PLA) reforçados com fibras de vidro picadas e fibra de celulose de jornais reciclados (FCJR) foram obtidos por extrusão em dupla-rosca seguida de moldagem por injeção. Adicionalmente um compósito de polipropileno (PP) reforçado com fibra de vidro (FV) foi preparado e comparado com os compósitos de PLA e FCJR e de PLA e FV. Os módulos de tensão e flexão do compósito reforçado com FCJR foram significativamente maiores quando comparados com a resina virgem.

A morfologia avaliada por microscopia eletrônica de varredura, indicou uma dispersão uniforme de ambas as fibras na matriz de PLA. As propriedades mecânicas e termo-físicas dos compósitos de PLA com FCJR, PLA com FV e PP com FV foram estudados e comparados usando as técnicas de Análise Dinâmico-Mecânica (DMA) e Análise Termo-gravimétrica (TGA). Os resultados de DMA confirmaram que os módulos de elasticidade dos compósitos de PLA com FCJR aumentaram em relação ao polímero puro enquanto o fator mecânico ($\tan \delta$) se reduziu. Os resultados dos experimentos de TGA indicaram que a adição da fibra aumentou a estabilidade térmica dos biocompósitos comparado com o PLA puro.

A temperatura de deflexão térmica dos compósitos de PLA com FCJR foi encontrada da mesma ordem de grandeza da temperatura de deflexão térmica dos compósitos de PLA reforçado com FV.

Segundo BRAHMAKUMAR [61] a fibra de coco tem sido usada como reforço em polietileno de baixa densidade. O efeito da camada superficial de cera da fibra na interação de interface matriz e fibra, bem como as propriedades do compósito foram estudadas por meio de um teste de tração de fibra única. Os efeitos de orientação das fibras no compósito também foram avaliados. A camada de cera promove uma boa ligação entre fibra-matriz e a remoção da cera resulta em diminuição drástica tensão de retirada da fibra única, bem como aumento do comprimento crítico da fibra e o correspondente decréscimo da resistência ao rasgo e o módulo do compósito. A camada de cera do polímero natural também exibe um efeito forte de ligação interfacial num enxerto de cera de C₁₅ numa fibra livre de cera.

O aspecto morfológico da fibra ao longo da superfície com a matriz favorece o escoamento orientado de fibras relativamente longas (20 mm) ao longo da matriz fundida durante a extrusão, em contraste com a fibra de sisal e a fibra de abacaxi (comprimento limite de 6mm) sob condições idênticas de extrusão. A resistência ao rasgo longitudinal e o módulo do compósito da fibra de coco melhora cerca de 300% e 700%, respectivamente, pela incorporação 0,25 V_f (Fração volumétrica da fibra) de fibra longa de 20mm. A remoção da camada de cera resulta numa fraca ligação interfacial que aumenta a tensão crítica da fibra em 100%, reduz a resistência ao rasgo em 40% e o módulo em 60%.

Segundo JOSHI [62] fibras naturais que apresentam baixo custo, são leves e ambientalmente superiores têm surgido como alternativa para fibra de vidro nos compósitos. A mesma superioridade dos compósitos com fibras naturais tem se apresentado pelos seguintes motivos: (1) a produção de fibras naturais apresenta impactos ambientais menores, se comparados aos provocados pela produção das fibras de vidro; (2) os compósitos de fibras naturais, para o mesmo desempenho que os compósitos de fibras de vidro, reduzindo a utilização de polímeros, outro material poluente; (3) as fibras naturais são mais leves e promovem a eficiência dos combustíveis, além de reduzir a emissão de poluentes resultantes da combustão, principalmente em aplicações automotivas; e (4) o final do ciclo de vida da incineração das fibras naturais resulta em recuperação de energia e créditos de carbono.

3. OBJETIVOS

O presente trabalho tem como objetivo o reaproveitamento de embalagens cartonadas pós-consumo como reforço em compósito com Polietileno de baixa densidade e assim:

- 1) maximizar o teor de embalagem cartonada empregada no compósito sem perder as propriedades mecânicas do compósito;
- 2) melhorar o aspecto visual do compósito por meio de incorporação de concentrado de cores.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

A seguir são apresentados os materiais e os métodos utilizados neste trabalho.

4.1 *Materiais utilizados*

Os materiais utilizados na preparação dos corpos-de-prova para os ensaios de tração foram a embalagem cartonada, polietileno de baixa densidade, concentrado de cor branco e concentrado de cor preto.

A escolha dos materiais supra citados deu-se pelos seguintes motivos:

a) Embalagem cartonada: existem alguns processos que separam as fibras de celulose do polímero e do alumínio, o que significa uma etapa adicional no tratamento do resíduo, coisa que se quis evitar.

O descarte de embalagens cartonadas vem crescendo na sua geração e por apresentar materiais de diferentes grupos (papel, polímero e metal) decidiu-se pela utilização da embalagem moída apenas.

b) Polietileno de baixa densidade: como a própria embalagem já possui o Polietileno de baixa densidade na sua composição, a escolha foi natural para evitar a necessidade de eventuais agentes de compatibilização entre o Polietileno de baixa densidade da embalagem e um segundo polímero.

c) Concentrado de cor branco e concentrado de cor preto: pode-se dizer que a maioria das cores comerciais de polímeros conta com um mínimo de concentrado de cor branco (TiO_2) e um mínimo de concentrado de cor preto (negro de fumo). Em peças predominantemente brancas ou predominantemente pretas, o teor máximo que se costuma trabalhar é entre 0,5 e 2% (m/m) do concentrado de cor.

4.1.1 **Embalagem Cartonada**

As embalagens previamente picotadas a partir de embalagens cartonadas foram fornecidas pela empresa Mercoplás Indústria e Comércio Ltda ME, em sacos de 20 kg, perfazendo um total de 60 kg de ELV.. A Figura 3 ilustra a embalagem utilizada.



Figura 3: Embalagem cartonada lavada, seca e picotada.

4.1.2 Polietileno de Baixa Densidade (PEBD)

O PEBD na forma de grãos foi cedido pela empresa Polietilenos União AS, em sacos de 20 kg (num total de 200 kg) e apresenta as seguintes características:

Tipo: PEBD UB2076

Índice de fluidez (190°C/2, 16kg): 7,6 g/10min

Densidade: 0,920 g/cm³

Temperatura de fusão: 107°C

Temperatura de amolecimento Vicat: 87°C

Tensão de ruptura: 10 MPa

Alongamento na ruptura: 611%



Figura 4: Polietileno de Baixa Densidade em forma de grãos

4.1.3 Concentrado de cor

As amostras de concentrado de cor foram cedidas pela empresa Cromex Brancolor SA, em sacos de 1 kg.

4.1.3.1 Concentrado de cor branco

O concentrado de cor branco na forma de *grãos* apresenta as seguintes características:

Polímero: PEBD

MFI: 7 g/10min

TiO₂: 71%

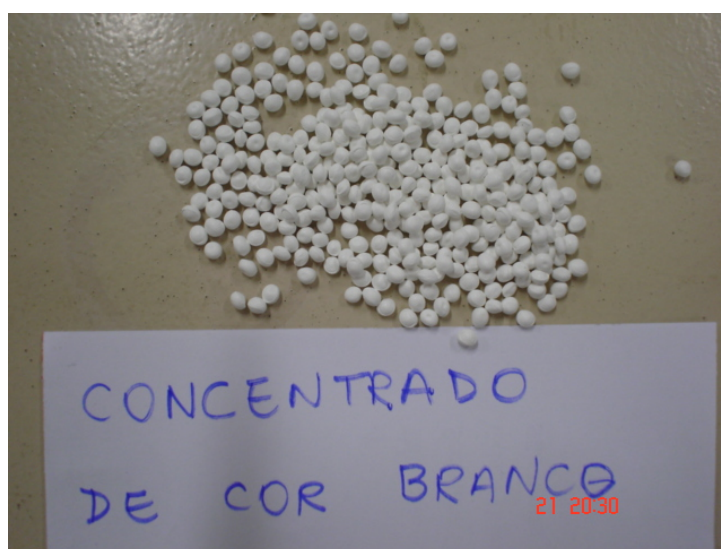


Figura 5: Concentrado de cor branco (TiO₂) em forma de grãos

4.1.3.2 Concentrado de cor preto

O concentrado de cor preto na forma de *grãos* apresenta as seguintes características:

Polímero: PEBD

MFI: 30 g/10min

Negro de Fumo: 50%

Toxicidade: isento de metais pesados



Figura 6: Concentrado de cor Preto (Negro de fumo) em forma de grãos

4.2 Métodos utilizados

Inicialmente partiu-se de um projeto de experimentos com o objetivo de variar o teor de embalagem cartonada (0, 5, 10, 20, 30%) com os concentrados de cores branco e preto (2% para cada um deles). Determinado os ensaios a serem realizados, seguiu-se para a preparação das amostras para os processos de extrusão e posterior injeção. Tais detalhes seguem abaixo.

4.2.1 Projeto de experimentos (matriz de ensaios)

Inicialmente foi aplicado um projeto de experimentos (conforme apresentado no anexo A) para se determinar os ensaios a serem feitos. A Tabela 4 apresenta as variáveis independentes estudadas.

Tabela 4: Variável independente estudada no processo

Parâmetro
Teor de embalagem cartonada (%)
Teor de concentrado de cor branco (%)
Teor de concentrado de cor preto (%)

Para definir os teores de embalagem cartonada e os teores de concentrado de cor branco e concentrado de cor preto, atribuiu-se letras e números para melhor representá-los. A Tabela 5 apresenta as letras e números respectivamente para estes ensaios.

Tabela 5: Representação utilizada para os ensaios mecânicos

<i>Teor de embalagem cartonada (%)</i>	<i>Representação</i>
0	0EC
5	5EC
10	10EC
20	20EC
30	30EC
<i>Teor de concentrado de cor branco (%)</i>	<i>Representação</i>
0	0B
2	2B
<i>Teor de concentrado de cor preto (%)</i>	<i>Representação</i>
0	0P
2	2P

Partiu-se de teores de embalagens diferentes para o estudo (30%, 20%, 10%, 5%) e como o objetivo da utilização de concentrado de cor é o de melhorar o aspecto visual do material compósito, inicialmente trabalhou-se com o teor de 1% tanto para o concentrado de cor branco tanto para o concentrado de cor preto. Como o aspecto visual não atingiu seu objetivo, isto é, o corpo de prova ainda apresentou pedaços de material reciclado visíveis a olho nu e as propriedades mecânicas do material compósito não se alteraram, aumentou-se o teor de concentrado de cor branco e concentrado de cor preto para 2%.

A Tabela 6 apresenta as variáveis dependentes referente ao ensaio Mecânico de Tração.

Tabela 6: Variáveis dependentes estudadas no processo.

Variável Dependente	Sigla	Unidade
Módulo de Elasticidade	ModElast	MPa
Tensão na Força Máxima	T _{máx}	MPa
Tensão na Ruptura	T _{Rup}	MPa
Deformação na Tensão Máxima	DefT _{máx}	%
Deformação na Tensão de Ruptura	DefT _{Rup}	%

De acordo com cada variável independente estudada no processo, determinou-se o número de ensaios com os respectivos valores de teores de embalagem cartonada e teores de concentrado de cor branco e concentrado de cor preto. A Tabela 7 apresenta a matriz de ensaios para os experimentos de extrusão e injeção com a representação apresentada na Tabela 5.

Tabela 7: Matriz de Ensaios para o projeto fatorial

Ensaio	Teor de embalagem cartonada (%)	Teor de concentrado de cor Branco (%)	Teor de concentrado de cor preto (%)
0EC0B0P	0	0	0
0EC0B2P	0	0	2
0EC2B0P	0	2	0
0EC2B2P	0	2	2
5EC0B0P	5	0	0
5EC0B2P	5	0	2
5EC2B0P	5	2	0
5EC2B2P	5	2	2
10EC0B0P	10	0	0
10EC0B2P	10	0	2
10EC2B0P	10	2	0
10EC2B2P	10	2	2
20EC0B0P	20	0	0
20EC0B2P	20	0	2
20EC2B0P	20	2	0
20EC2B2P	20	2	2
30EC0B0P	30	0	0
30EC0B2P	30	0	2
30EC2B0P	30	2	0
30EC2B2P	30	2	2

4.2.2 Preparação das amostras pelo processo de extrusão e injeção

A partir do projeto de experimentos apresentado no item anterior, seguiu-se para o processo de extrusão e posterior injeção onde os ensaios foram preparados respeitando-se a composição determinada na Tabela 7, porém foram sorteados para obtenção da ordem de realização. A mesma ordem obtida no sorteio para extrusão foi seguida para os ensaios de injeção.

As quantidades de polímero, embalagem cartonada, concentrado de cor branco e concentrado de cor preto, foram pesadas em balança semi-analítica, acondicionadas em sacos de PEBD com volume de 5L e homogeneizados manualmente.

Uma vez homogeneizados, foram acondicionados no funil da extrusora e processados de acordo com as condições apontadas na Tabela 8.

Tabela 8: Parâmetros operacionais utilizados na Extrusora

Extrusora marca	Tectril
Temp. zona 1	90°C
Temp. zona 2	150°C
Temp. zona 3	160°C
Temp. zona 4	170°C
Temp. zona 5	175°C
Temp. zonas 6 a 9	180°C
Temp. no cabeçote	180°C
Temp. Refrigeração	50°C
Pressão	45 bar
Rotação da extrusora	503 rpm
Rotação do alimentador	37 rpm
Torque	49 N.m
Amperagem Bomba vácuo	20 A
D/L	30
Diâmetro da rosca	18 mm

Depois de sair da extrusora, os fios de polímero fundido foram mergulhados numa banheira de 2 metros de comprimento por 30 cm de largura e 20 cm de profundidade, com água corrente na temperatura ambiente. Uma vez endurecidos e antes de resfriar completamente, os fios de polímeros ao sair do banho de água, entraram na granuladeira. O material granulado processado após a extrusão foi novamente acondicionado em sacos plásticos de PEBD e seguindo-se a mesma ordem do sorteio supra citado, foram processados na injetora para obtenção dos corpos-de-prova para os ensaios de tração. Antes da injeção de cada formulação, a rosca e o bico da injetora foram limpos pela passagem de PEBD virgem. Quando o material que saía da injetora estava limpo, iniciava-se então a injeção do próximo ensaio. Esta operação foi repetida até que todos os ensaios tivessem sido injetados. Na Tabela 9, segue os parâmetros operacionais utilizados na Injetora.

Tabela 9: Parâmetros operacionais utilizados na Injetora

Injetora Marca	Demag
Temp. zona 1	165°C
Temp. zona 2	170°C
Temp. zona 3	175°C
Temp. zona 4	180°C
Média da pressão de injeção	50 bar
Tempo de resfriamento	18 segundos
Diâmetro da rosca	25 mm
Recalque	45
Pressão de recalque	70 bar
Ciclo de injeção	2 segundos

4.2.3 Ensaio de Resistência à Tração

Os ensaios de Resistência à Tração foram realizados segundo a Norma ASTM D-638/98. Os dados dos ensaios são apresentados na Tabela 10.

Tabela 10: Parâmetros operacionais utilizados para os ensaios de Resistência à Tração

Máquina de Tração marca	Emic BL 2000
Célula de carga	500 Kgf
Comprimento da base	115 mm
Correção do alongamento (pré-carga)	5%
Velocidade de ensaio	50 mm/min
Limite de força	4500 N
Limite de deformação	600 mm

4.2.4 Micrografias

As amostras provenientes dos corpos-de-prova dos ensaios mecânicos foram preparadas por imersão dos mesmos em nitrogênio líquido por 3 minutos e posterior quebra do corpo de prova na região congelada, provocando uma fratura frágil. A região da fratura frágil foi então analisada no microscópio eletrônico de varredura com associação de um analisador por difração de Raios-X, sob as seguintes condições conforme Tabela 11:

Tabela 11: Parâmetros operacionais utilizados para as micrografias

Marca do Microscópio	Oxford Instruments
Modelo	INCA X-SIGHT
Tensão (kV)	15,0
Distância entre amostra e microscópio (mm)	9,9 ± 9
Tamanho da região analisada (mm ²)	5,0
Pressão (Torr)	0,98

4.2.5 Índice de Fluidez

As amostras provenientes dos corpos-de-prova dos ensaios de tração foram submetidos para a realização dos ensaios de índice de fluidez segundo a norma ASTM – D1238 conforme condições da Tabela 12:

Tabela 12: Parâmetros operacionais utilizados para os ensaios de Índice de Fluidez

Equipamento de Índice de Fluidez marca	CEAST modelo Type 6542
Peso	2,16 Kg
Temperatura	190°C

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os corpos de prova foram extrudados e o material granulado foi injetado para obtenção dos corpos-de-prova conforme citado no item anterior. Os corpos-de-prova foram avaliados pelo ensaio de Resistência à Tração e posteriormente os corpos-de-prova foram submetidos à preparação para análise de microestrutura.

Os resultados obtidos da avaliação de resistência à tração são apresentados na Tabela 13.

Tabela 13: Resultados dos ensaios de Resistência à Tração

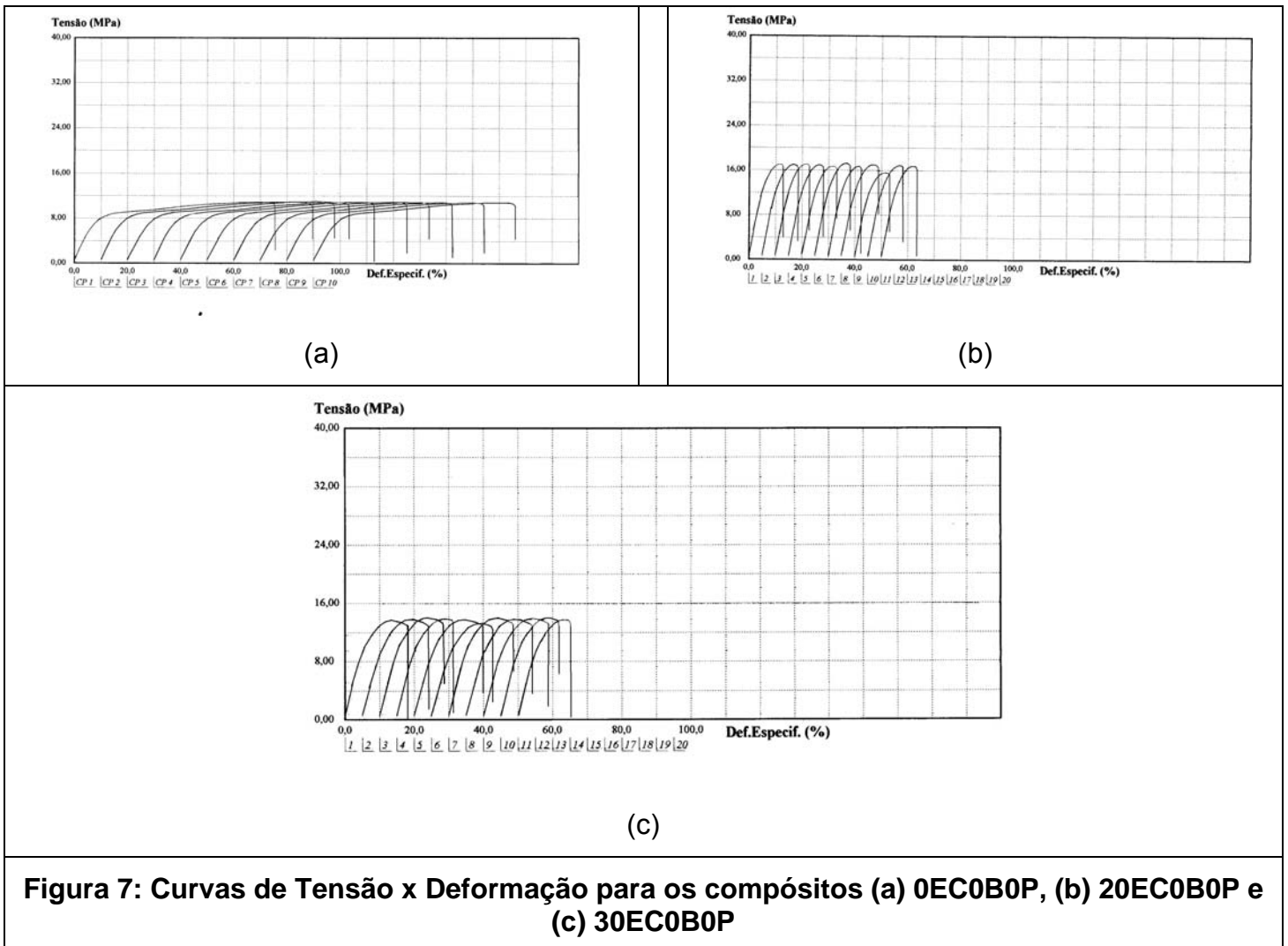
Ensaio	N° ensaios	ModElast	Erro	Tmáx	Erro	TRup	Erro	DefTmáx	Erro	DefTrup	Erro
0EC0B0P	10	53,00	3,0	10,92	0,01	9,97	0,03	68,2	0,4	76,0	1,0
0EC0B2P	10	51,60	0,40	10,75	0,02	9,78	0,04	69,0	1,0	76,0	1,0
0EC2B0P	10	53,00	2,0	10,8	0,04	9,95	0,1	72,0	1,0	79,0	1,0
0EC2B2P	9	53,00	2,0	10,8	0,1	9,77	0,1	70,4	0,4	80,0	1,0
5EC0B0P	9	58,20	0,90	11,94	0,04	10,9	0,1	57,0	0,4	63,0	1,0
5EC0B2P	10	59,00	2,0	11,4	0,1	10,5	0,1	55,4	0,2	61,0	1,0
5EC2B0P	9	59,00	1,0	11,95	0,02	10,8	0,1	55,9	0,4	62,0	1,0
5EC2B2P	10	72,00	3,0	12,12	0,04	11,1	0,1	54,9	0,4	60,0	1,0
10EC0B0P	9	154,00	3,0	12,37	0,03	11,4	0,1	36,0	1,0	41,0	1,0
10EC0B2P	9	142,00	2,0	12,25	0,02	11,4	0,1	36,1	0,9	40,0	1,0
10EC2B0P	10	141,00	2,0	11,8	0,1	10,9	0,2	35,0	2,0	39,0	2,0
10EC2B2P	9	160,00	2,0	12,4	0,1	11,0	1,0	35,2	0,9	35,0	5,0
20EC0B0P	11	269,00	2,0	16,79	0,1	16,3	0,1	11,5	0,1	13,2	0,1
20EC0B2P	11	263,00	3,0	16,1	0,03	15,4	0,1	11,3	0,1	13,5	0,2
20EC2B0P	11	263,00	1,0	16,48	0,04	16,9	0,1	11,6	0,1	13,2	0,1
20EC2B2P	10	245,00	3,0	15,8	0,1	15,1	0,1	11,5	0,1	13,7	0,4
30EC0B0P	11	192,00	4,0	13,9	0,1	12,9	0,1	13,9	0,1	18,1	0,4
30EC0B2P	10	222,00	5,0	14,64	0,03	13,9	0,1	13,4	0,2	15,8	0,3
30EC2B0P	10	213,00	2,0	14,78	0,03	14,0	0,1	13,7	0,1	16,3	0,3
30EC2B2P	11	210,00	3,0	14,4	0,1	13	1,0	13,5	0,2	15,0	2,0

De acordo com a Tabela 13, pode-se afirmar que os resultados de maiores valores de Módulo de Elasticidade, Tensão Máxima, Tensão de Ruptura e menores valores de Elongamento na Tensão Máxima e Elongamento na Tensão de Ruptura encontram-se entre os ensaios 20EC0B0P e 30EC2B2P.

5.1. Resultados de ensaio de Tração

Os resultados dos ensaios de tração são apresentados nas figuras de 8 a 11.

A figura 7 mostra as curvas de tensão x deformação para alguns compósitos.



A Figura 7a mostra o comportamento do PEBD, cujo valor de alongação é alto e Módulo de Elasticidade é baixo (comparativamente aos demais compósitos com EC). A figura 7b mostra o comportamento do compósito com 20% (m/m) de EC e sem pigmentos; pode-se notar que o valor do Módulo de Elasticidade aumenta e que o valor de Alongação se reduz em relação ao PEBD. A Figura 7c mostra o mesmo tipo de comportamento para o compósito mostrado na figura 7b. Em ambos os casos do compósito reforçado com EC, acontece o aumento do Módulo de Elasticidade e redução da Alongação e tal comportamento deve-se à ação reforçante da EC.

A Figura 8 mostra o resultado do Módulo de Elasticidade em função do teor de embalagem cartonada.

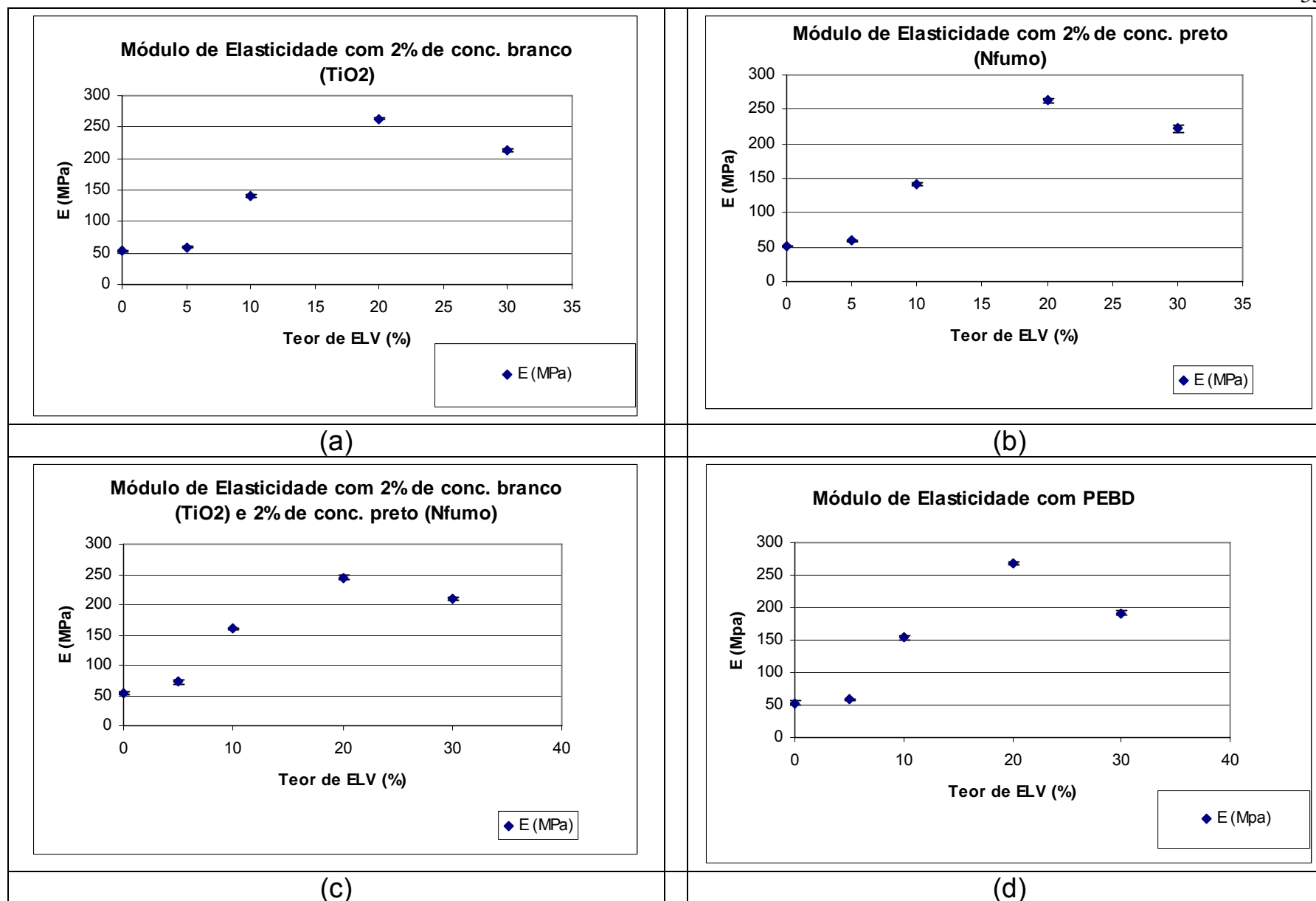


Figura 8: Módulo de Elasticidade em função do teor de embalagem cartonada (ou Longa Vida) para amostras (a) apenas com TiO₂, (b) apenas com Negro de Fumo, (c) com TiO₂ e Negro de Fumo (d) apenas com o polímero (PEBD).

Conforme se pode notar nas Figuras 8 (a), (b), (c) e (d), não houve variação para o comportamento do Módulo de Elasticidade para qualquer um dos ensaios avaliados. Os fatores “teor de concentrado de cor branco” e “teor de concentrado de cor preto” não contribuem de forma significativa (considerando significância de 5%) para o resultado do módulo de elasticidade e o fator significativo para este resultado é o teor de embalagem cartonada.

Quando se tem dois fatores “teor de concentrado de cor branco” e “teor de concentrado de cor preto” juntos, o módulo de Elasticidade para o valor máximo diminui significativamente quando comparado com os fatores separadamente.

O Módulo de Elasticidade é representado pela tangente do ângulo da inclinação da componente elástica de uma curva de tensão-deformação de um compósito e depende dos módulos individuais do polímero e do reforço (no caso a embalagem cartonada). À medida que se aumenta o teor de embalagem cartonada no compósito, o Módulo aumenta também, por conta do reforço agregado. Este efeito tem um aumento contínuo, até que se atinja o limite de homogeneização entre o polímero e o reforço. Deste ponto em diante, o aumento do teor de embalagem cartonada reduz a adesão entre o polímero e a embalagem cartonada, formando pontos que contribuirão para propagar a falha do compósito quando solicitado.

A Figura 9 mostram os gráficos referente à tensão na força máxima variando com o teor de embalagem cartonada.

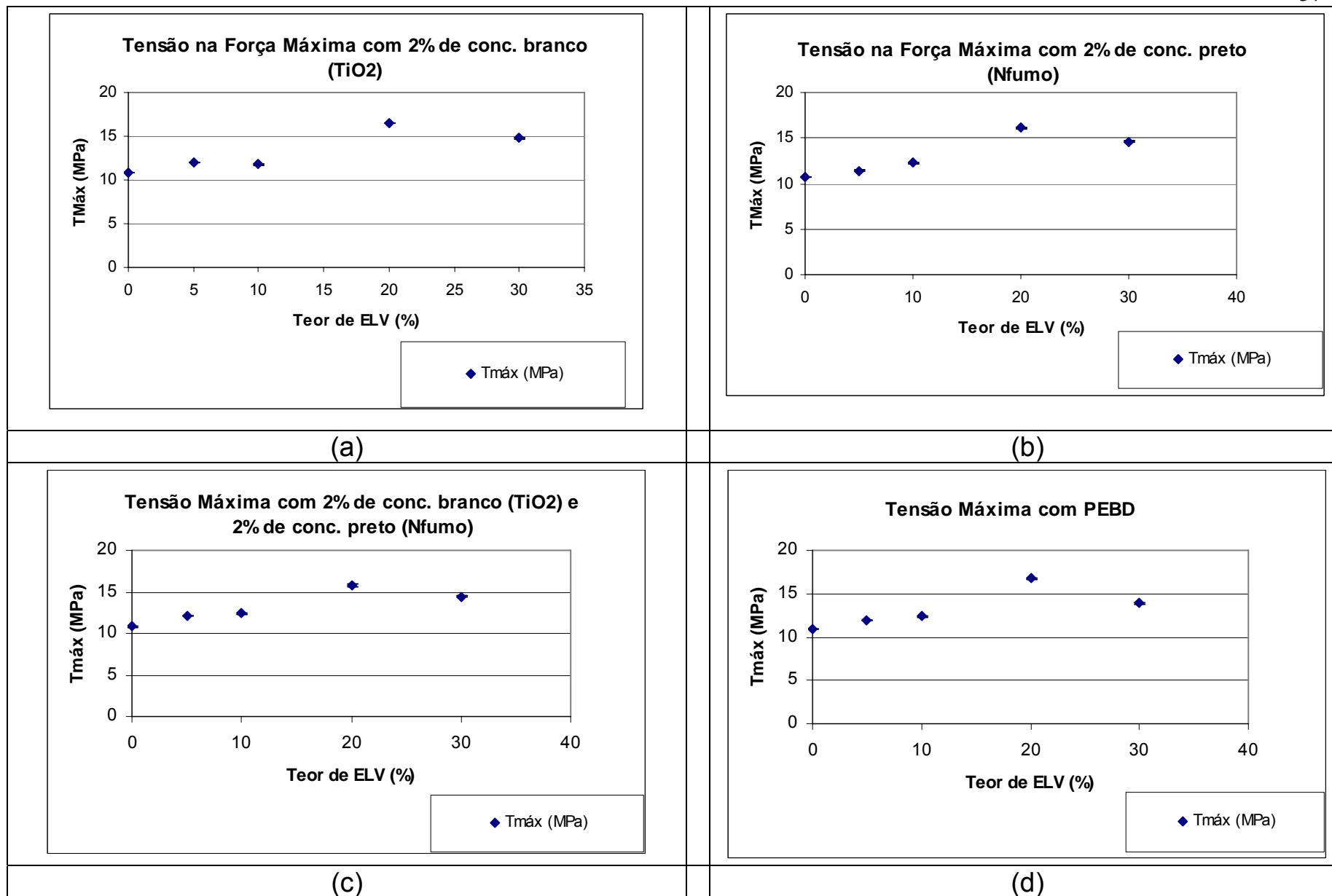


Figura 9: Tensão na Força Máxima em função do Teor de embalagem cartonada (ou Longa Vida) para amostras (a) apenas com TiO₂, (b) apenas com Negro de Fumo, (c) com TiO₂ e Negro de Fumo e (d) apenas com o polímero (PEBD)

De acordo com a Figura 9 (a), (b), (c) e (d), não houve variação para o comportamento da Tensão na força máxima para qualquer dos ensaios avaliados e também para os fatores “teor de concentrado de cor branco” e “teor de concentrado de cor preto” não contribuem de forma significativa (considerando significância de 5%) para o resultado da tensão na força máxima e o fator significativo para este resultado é o Teor de embalagem cartonada.

Quando temos dois fatores “teor de concentrado de cor branco” e “teor de concentrado de cor preto” juntos, a tensão máxima diminui se observado com os outros fatores separadamente.

A tensão na força máxima é representada pelo ponto mais alto na curva de tensão-deformação de um compósito. À medida que se aumenta o teor de embalagem cartonada no compósito, a tensão na força máxima aumenta também, por conta do reforço agregado. Este efeito vai até que se atinja um limite homogêneo entre o polímero e o reforço. A partir desse momento, o aumento do reforço reduz a interação entre o polímero e a embalagem cartonada, formando pontos que contribuirão para a propagação de falhas no compósito reduzindo a tensão na força máxima.

A Figura 8 mostra os resultados da tensão de ruptura e sua variação com o teor de embalagem cartonada.

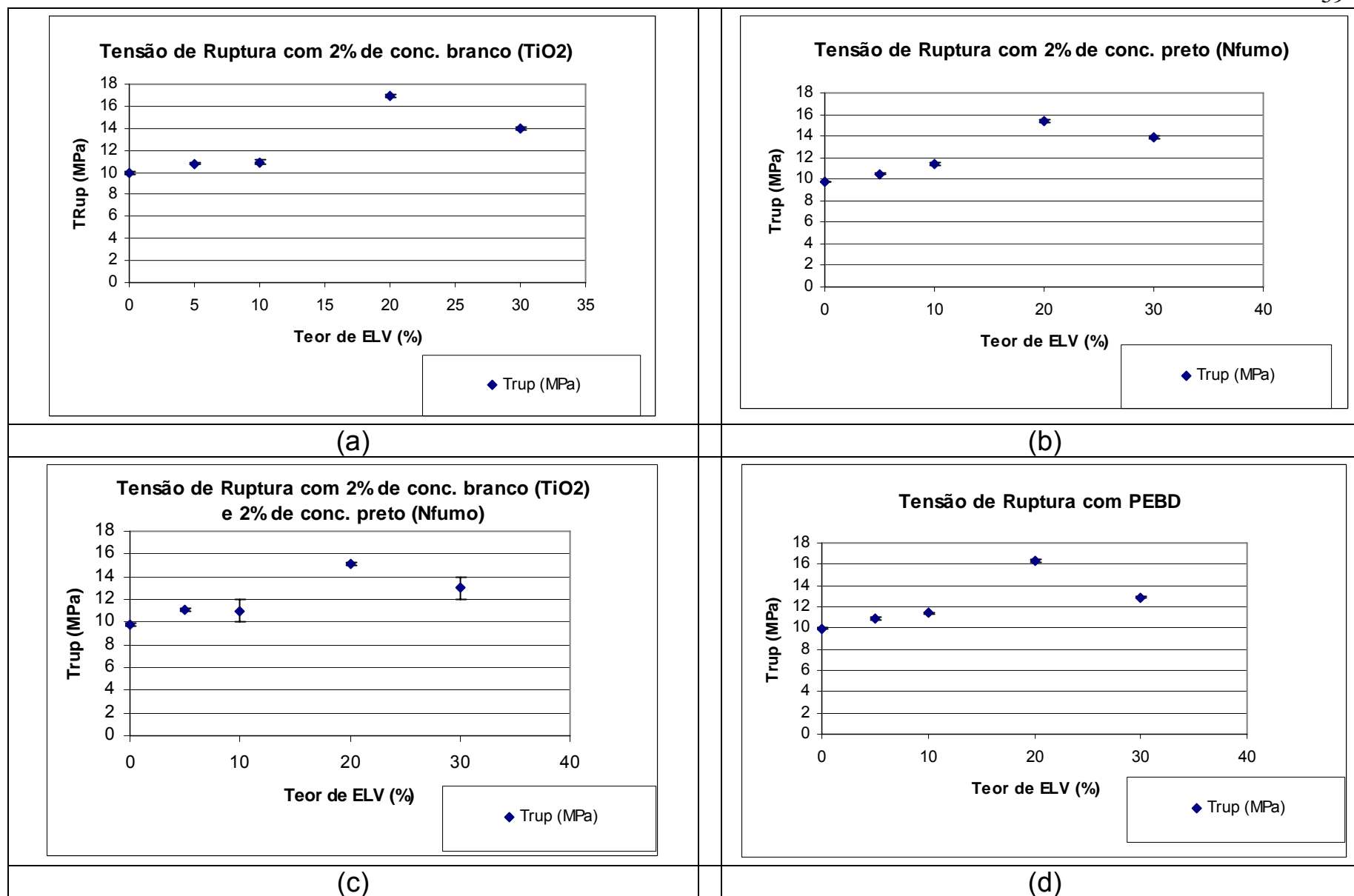


Figura 10: Tensão de Ruptura em função do Teor de embalagem cartonada (ou Longa Vida) para amostras (a) apenas com TiO₂, (b) apenas com Negro de Fumo, (c) com TiO₂ e Negro de Fumo e (d) apenas com o polímero (PEBD)

Observando-se a Figura 10 (a), (b), (c) e (d), também não houve variação para o comportamento da tensão de ruptura para os ensaios acima avaliados. O fator principal para a variação do resultado é o teor de embalagem cartonada.

A tensão de ruptura é representada pelo ponto no qual acontece a ruptura do corpo-de-prova no ensaio de tração do compósito. À medida que se aumenta o teor de embalagem cartonada no compósito, a Tensão de Ruptura aumenta também, devido ao reforço adicionado. Este efeito tem um aumento contínuo, até que se atinja o limite de homogeneização entre o polímero e o reforço. Deste ponto em diante, o aumento do teor de embalagem cartonada restringe a aderência entre o polímero e o reforço, formando pontos que contribuirão a falha do compósito reduzindo assim a tensão de ruptura.

A Figura 9 mostra os gráficos para o resultado da deformação máxima que varia com o teor de embalagem.

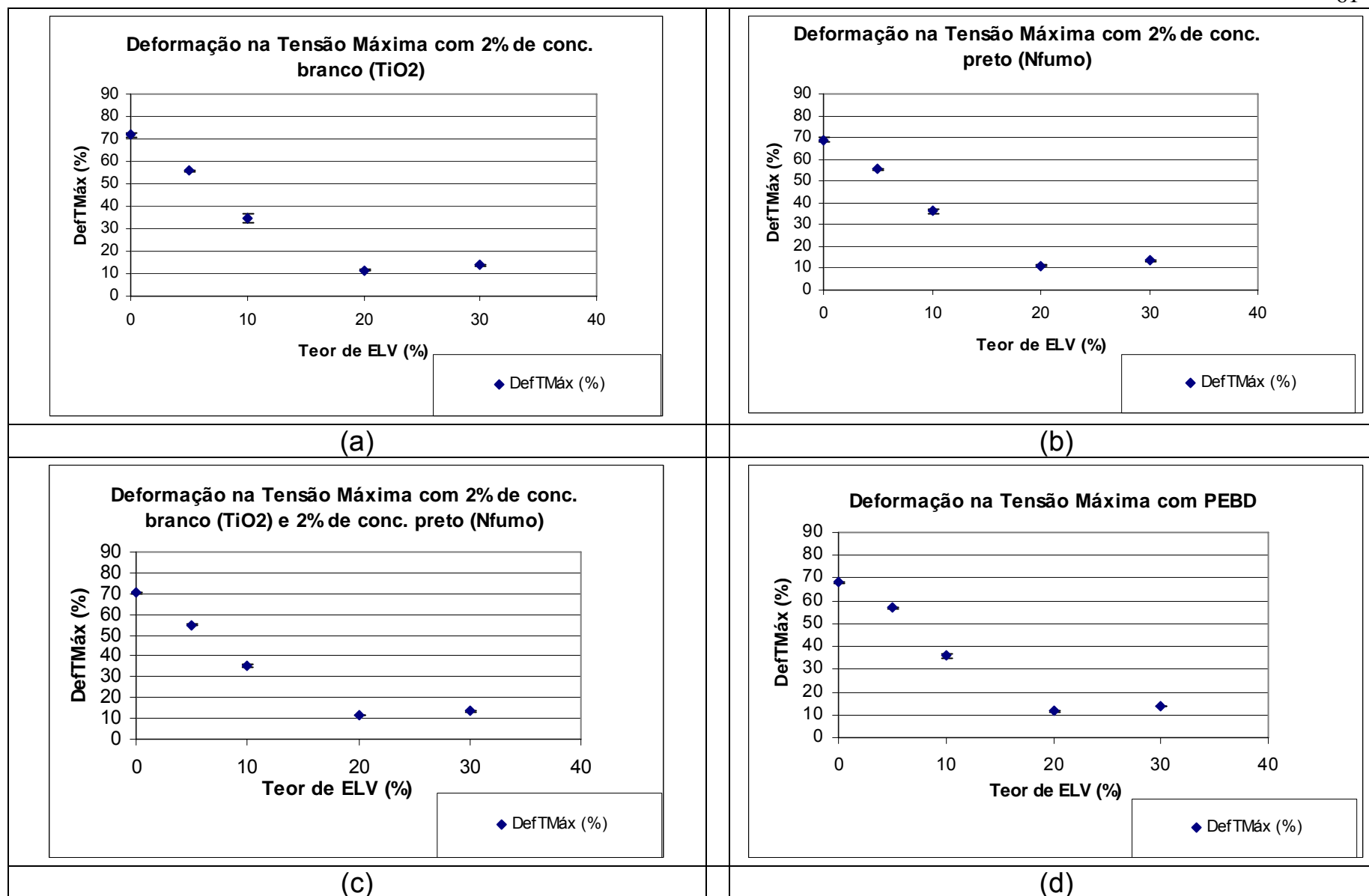


Figura 11: Deformação na Força Máxima em função do Teor de embalagem cartonada (ou Longa Vida) para amostras (a) apenas com TiO_2 , (b) apenas com Negro de Fumo, (c) com TiO_2 e Negro de Fumo e (d) apenas com o polímero (PEBD).

De acordo com a Figura 11 (a), (b), (c) e (d), não houve variação para o comportamento da deformação na tensão da força máxima (DTFM) para os ensaios avaliados.

A DTFM é o correspondente da deformação quando a tensão aplicada é máxima (ponto mais alto da curva de tensão-deformação) para um compósito. À medida que se aumenta o teor de embalagem cartonada no compósito, a DTFM sofre uma redução, pois o polímero PEBD é o responsável pelo comportamento elástico do compósito. À medida que se diminui o teor de PEBD a deformação do compósito sofre redução até o valor de mínimo estimado, porém o aumento do teor de embalagem cartonada acima do valor determinado não conduz a um aumento do valor da DTFM. Como nas discussões anteriores, o aumento do teor de embalagem cartonada tem uma redução contínua, até que se atinja o limite de homogeneização entre o polímero e o reforço. A partir deste ponto, o aumento do teor de embalagem cartonada vem no sentido de diminuir a aderência entre o polímero e o reforço, formando pontos de desigualdade que contribuirão para a propagação de falha do compósito.

A Figura 12 mostra os gráficos referente a deformação de ruptura e sua variação com o teor de embalagem cartonada.

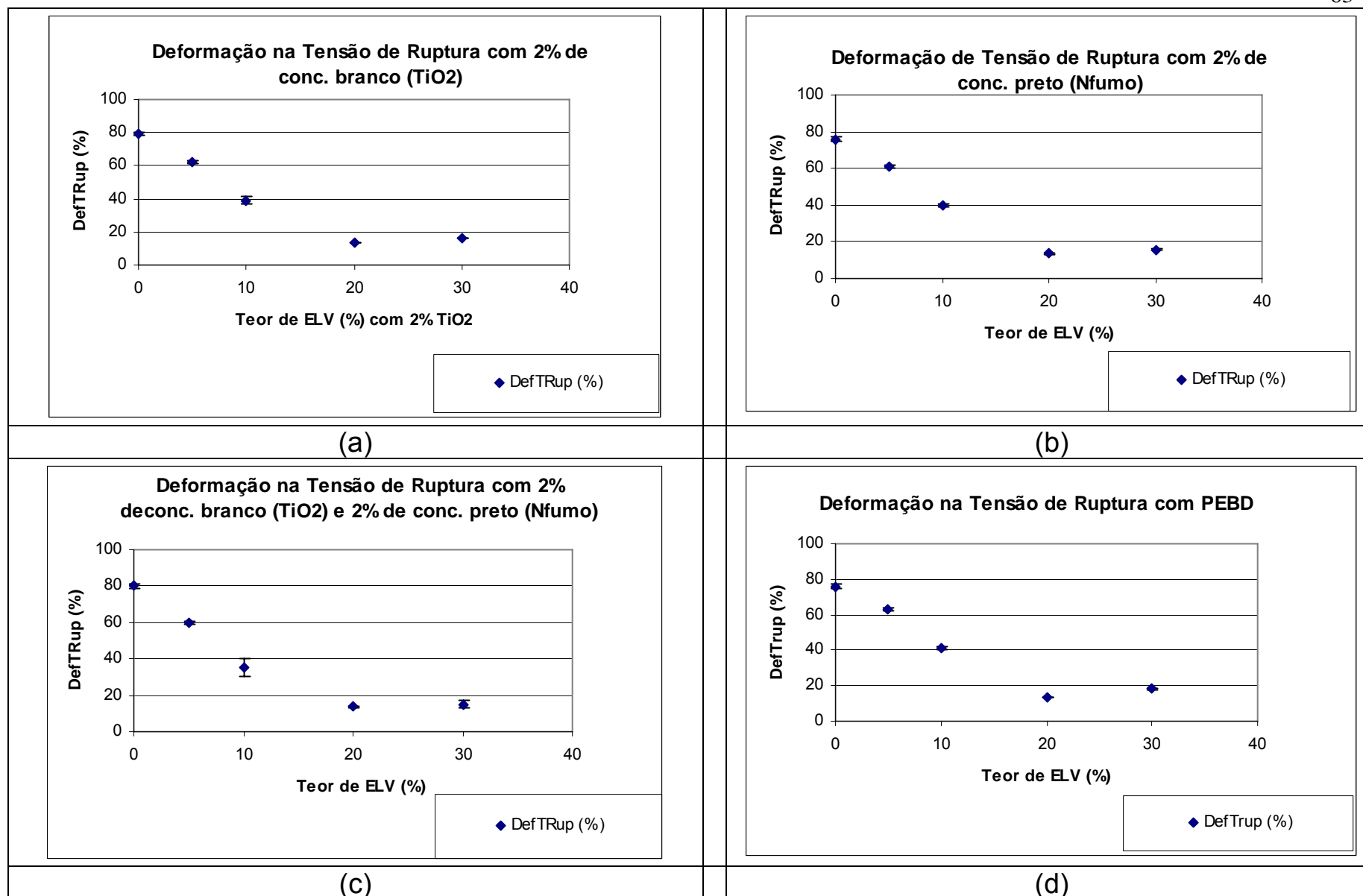


Figura 12: Deformação na Tensão de Ruptura em função do Teor de embalagem cartonada (ou Longa Vida) para amostras (a) apenas com TiO₂, (b) apenas com Negro de Fumo, (c) com TiO₂ e Negro de Fumo e (d) apenas com o polímero (PEBD).

Pela observação das Figuras 12 (a), (b), (c) e (d), verifica-se que como nos casos anteriores, não houve variação para o comportamento da deformação na tensão de ruptura (DTR) para os ensaios avaliados e o fator significativo para este resultado é o teor de embalagem cartonada.

A DTR é o correspondente da deformação no ponto de ruptura do corpo-de-prova. À medida que se aumenta o teor de embalagem cartonada no compósito, a DTR sofre uma redução, pois o polímero PEBD é o responsável pelo comportamento elástico do compósito. Ao reduzir o teor de PEBD (aumentando o teor de embalagem cartonada) a deformação do compósito sofre redução até o valor de mínimo estimado, porém o aumento do teor de embalagem cartonada acima do valor determinado não conduz a um aumento do valor da DTFM. Como nas discussões anteriores, o aumento do teor de embalagem cartonada tem uma redução contínua, até que se atinja o limite de homogeneização entre o polímero e o reforço (embalagem cartonada).

A determinação dos valores de mínimo e máximo do teor de embalagem cartonada para a faixa ótima aponta para teores entre 20% a 25%.

5.2 Resultados da análise do aspecto visual dos corpos de prova

Como o objetivo inicial da utilização dos concentrados de cores branco e preto era esconder os pontos visíveis existentes de material reciclado nos corpos de prova, com a utilização de 2% de concentrado de cor branco e 2% de concentrado de cor preto atingiu-se o objetivo. O parâmetro utilizado para esse teste foi observar a olho nu o aspecto visual dos corpos de prova. A Figura 13 mostra os corpos de prova com a incorporação do concentrado de cor branco e o concentrado de cor branco.



Figura 13: a) Corpos de prova com concentrado de cor branco e b) corpos de prova com concentrado de cor preto

5.3. Análise das micrografias obtidas por Microscopia Eletrônica da Varredura associada à Análise de Energia Dispersiva de Raios-X

As micrografias obtidas são as que se seguem nas Figuras 14 a 25. Algumas das regiões observadas foram também analisadas por EDS (*Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy*) para determinação da composição qualitativa e quantitativa dos pontos selecionados.

Com base na análise das Figuras 14 a 19 pode-se afirmar que as amostras do compósito com 5 % de embalagem cartonada apresentam homogeneidade na distribuição do reforço na matriz polimérica. Ao aumentar as concentrações de teor de embalagem observou-se aglomerados de reforço, formação de poros e deslocamento na matriz,

Os resultados de avaliação mecânica mostram um teor ótimo de concentração de reforço entre 20 e 25%. A justificativa para tal comportamento vem do entrelaçamento mecânico existente entre as fibras do papel e a matriz polimérica. Tal ancoragem mecânica aumenta a resistência mecânica devido à transferência de esforços da matriz para o reforço. Embora não haja uma boa interação química entre as fibras e a matriz polimérica, esse entrelaçamento mecânico cumpre essa função.

As Figuras 20 a 27 apresentam micrografias com uma região assinalada e a respectiva análise por EDS. Podem-se apontar então as regiões escuras como regiões de polímero (análise elementar com carbono apenas) e algumas regiões mais claras compostas de papel (análise elementar com carbono e oxigênio) ou alumínio. Em algumas Figuras aparecem as misturas de fases, devido ao tamanho de partícula muito pequeno para a técnica de análise por EDS.

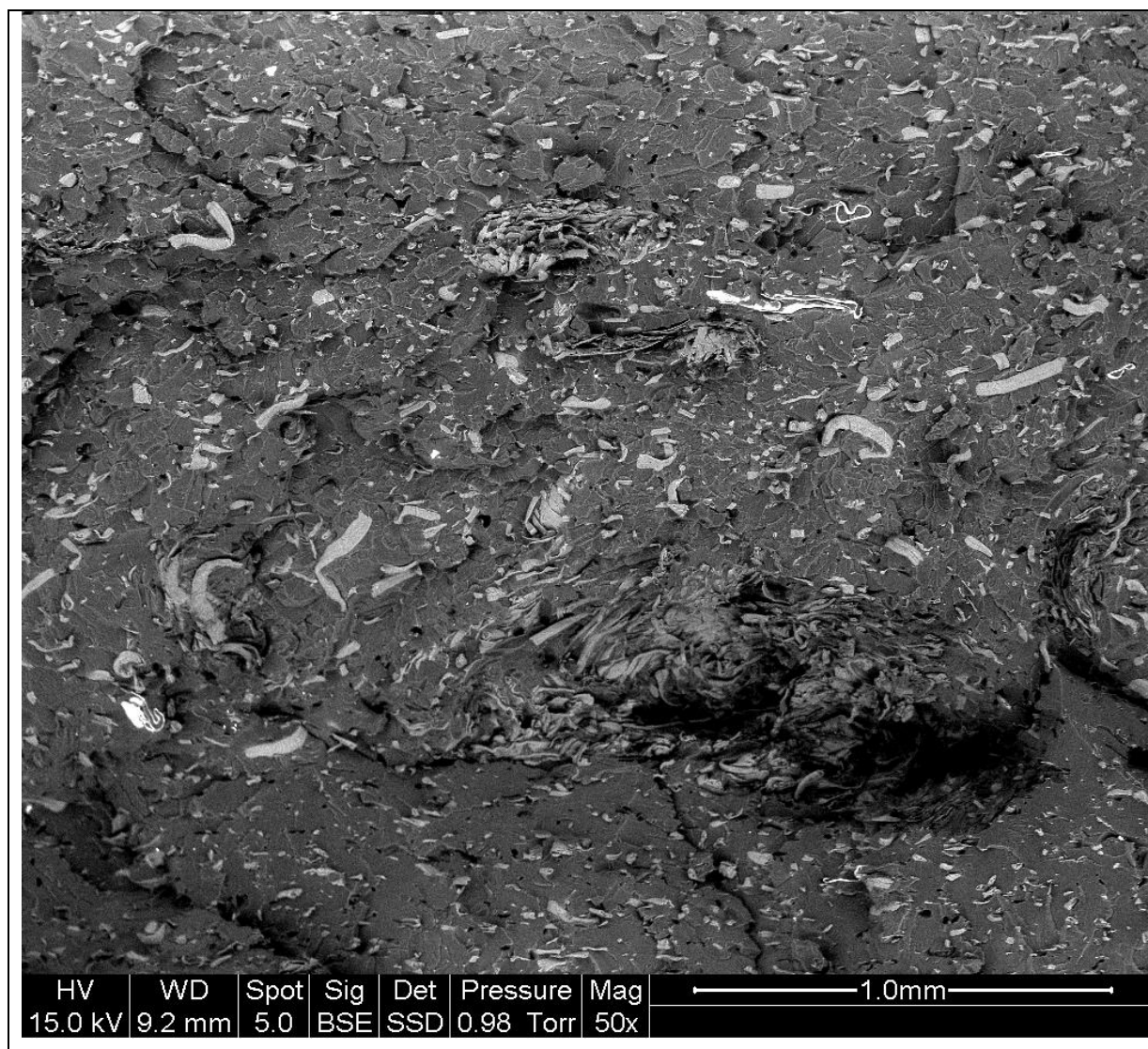


Figura 14: Imagens de elétrons secundários de amostra com 30% de embalagem cartonada mostrando aglomerados de papel e matriz descolada.



Figura 15: Imagens de elétrons secundários de amostra com 10% de embalagem cartonada mostrando aglomerados de papel com alumínio e matriz descolada.

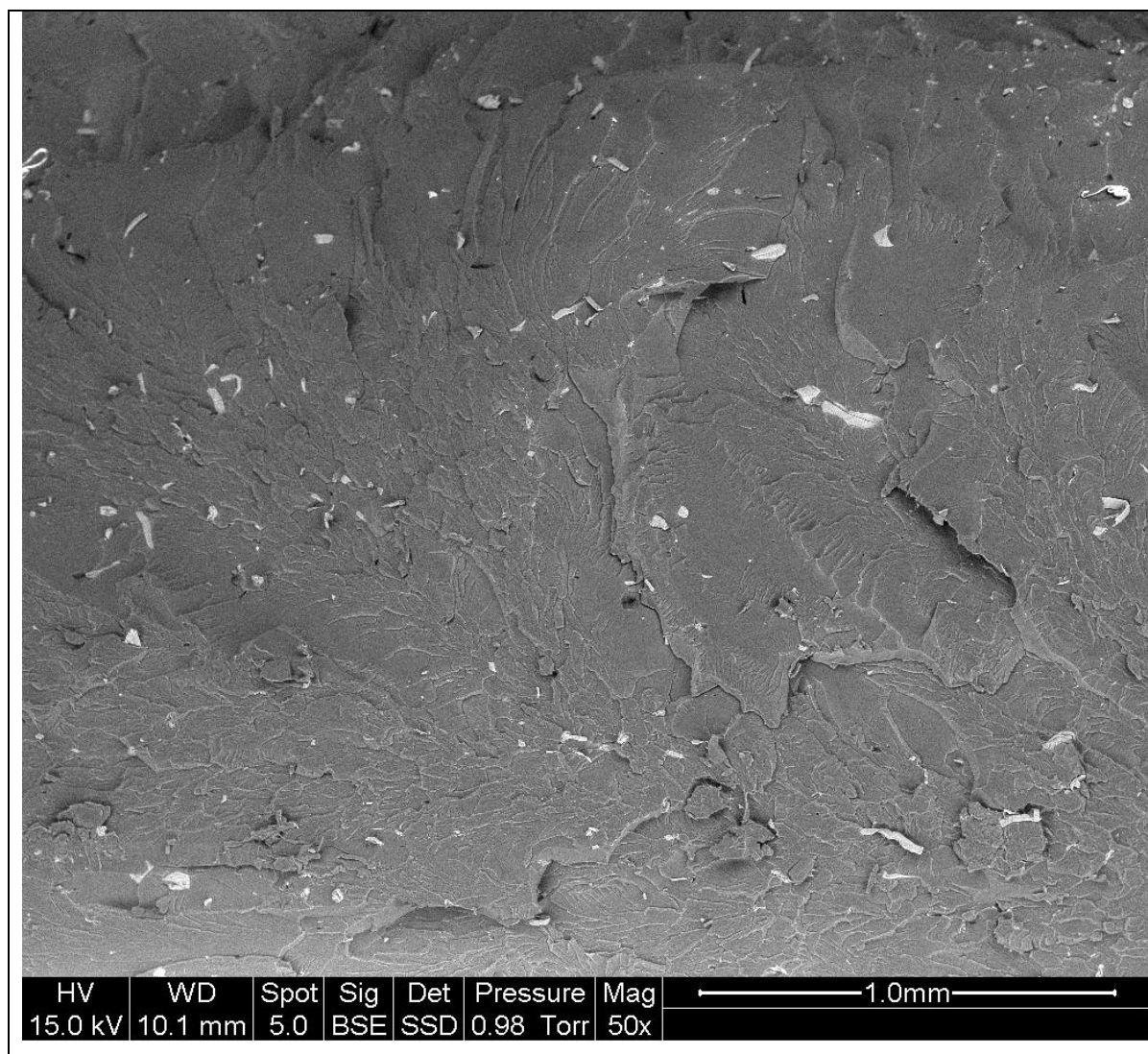


Figura 16: Imagens de elétrons secundários de amostra com 5% de embalagem cartonada boa uniformidade nas partículas dispersas com pouca matriz descolada.

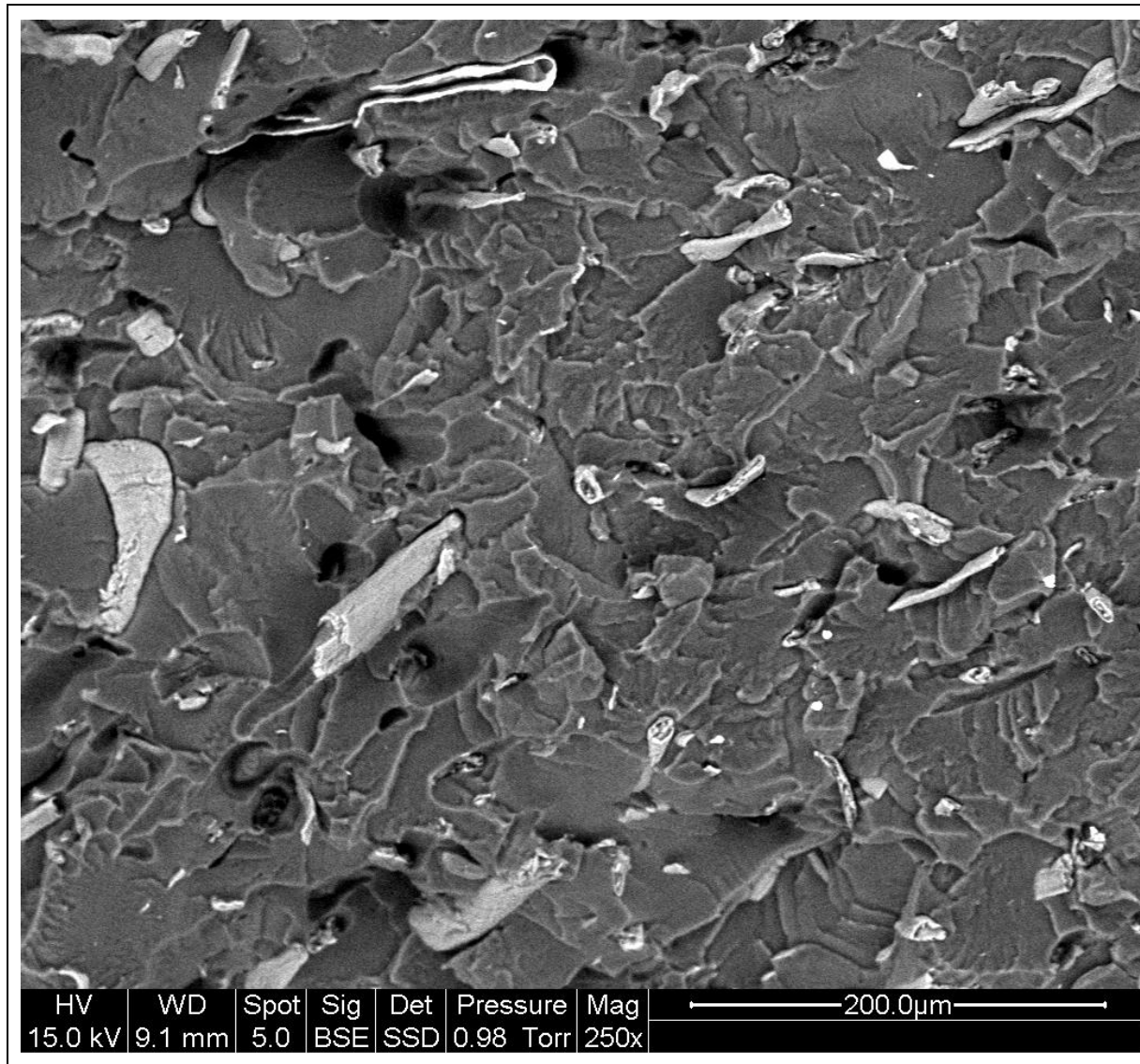


Figura 17: Imagens de elétrons secundários de amostra com 30% de embalagem cartonada mostrando aglomerados de material presente na embalagem cartonada com a presença de reentrâncias.

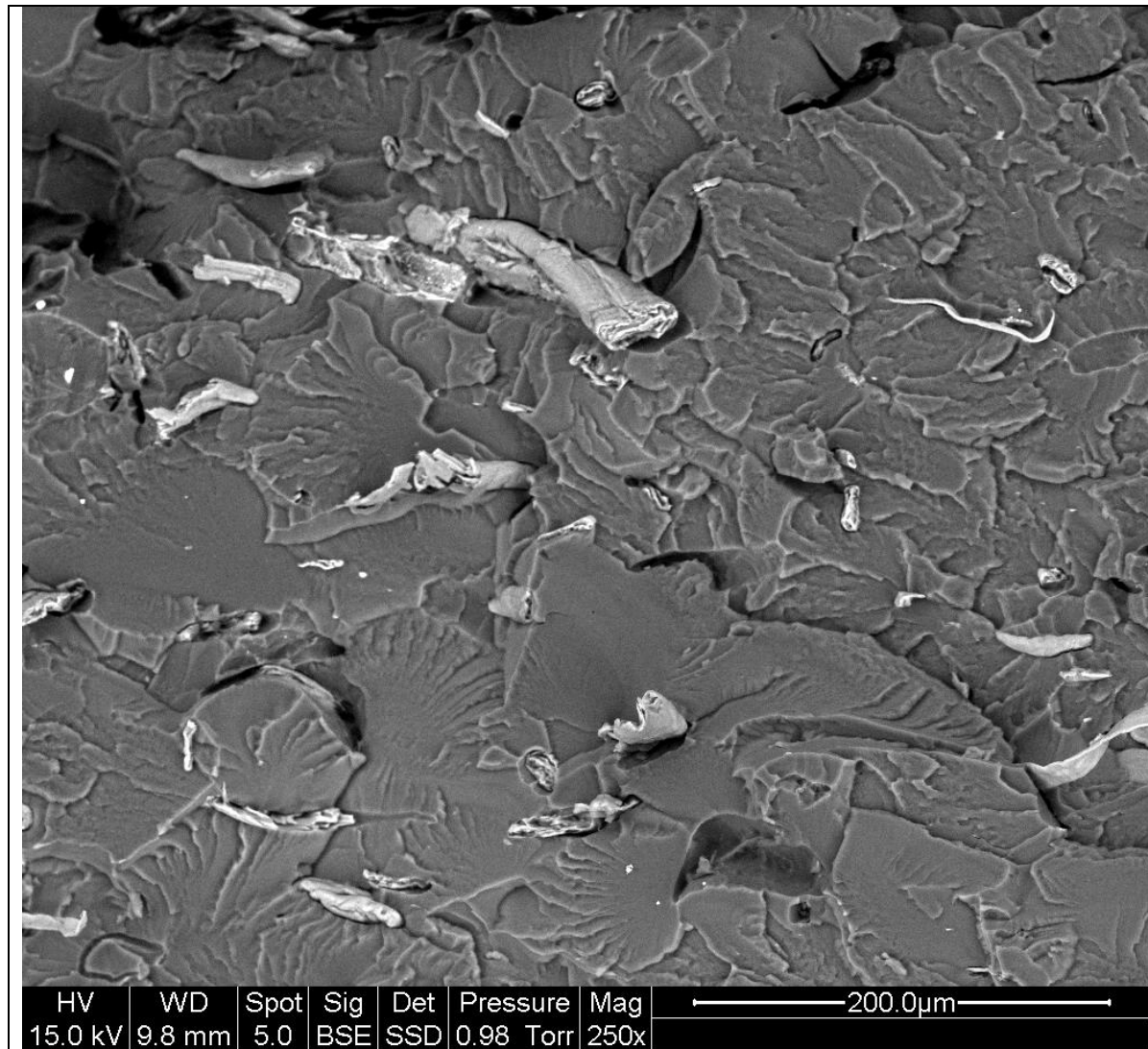


Figura 18: Imagens de elétrons secundários de amostra com 10% de embalagem cartonada mostrando aglomerados de material reciclado e com matriz descolada.

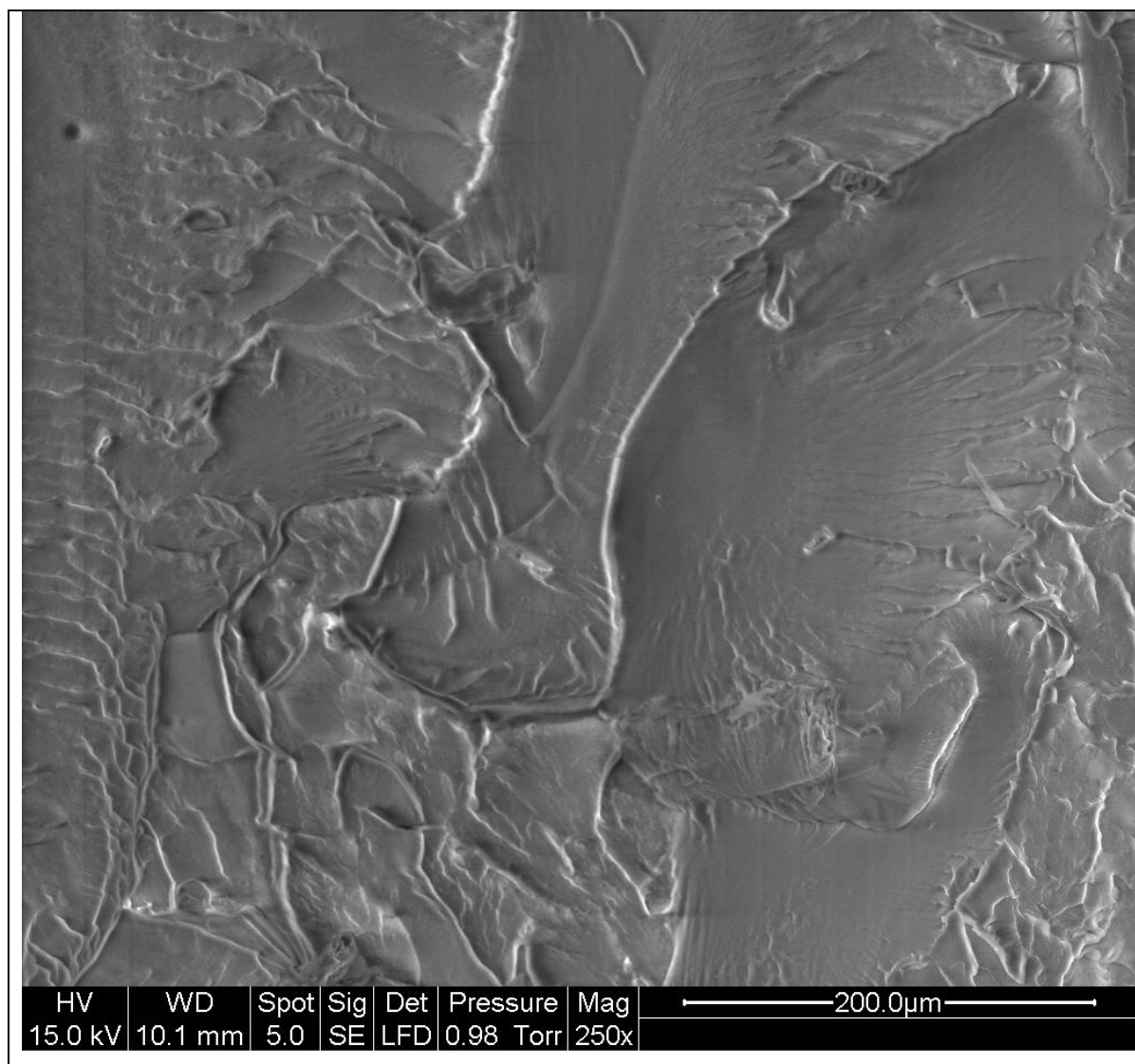


Figura 19: Imagens de elétrons secundários com 5% de embalagem cartonada mostrando uniformidade nas partículas de material reciclado.

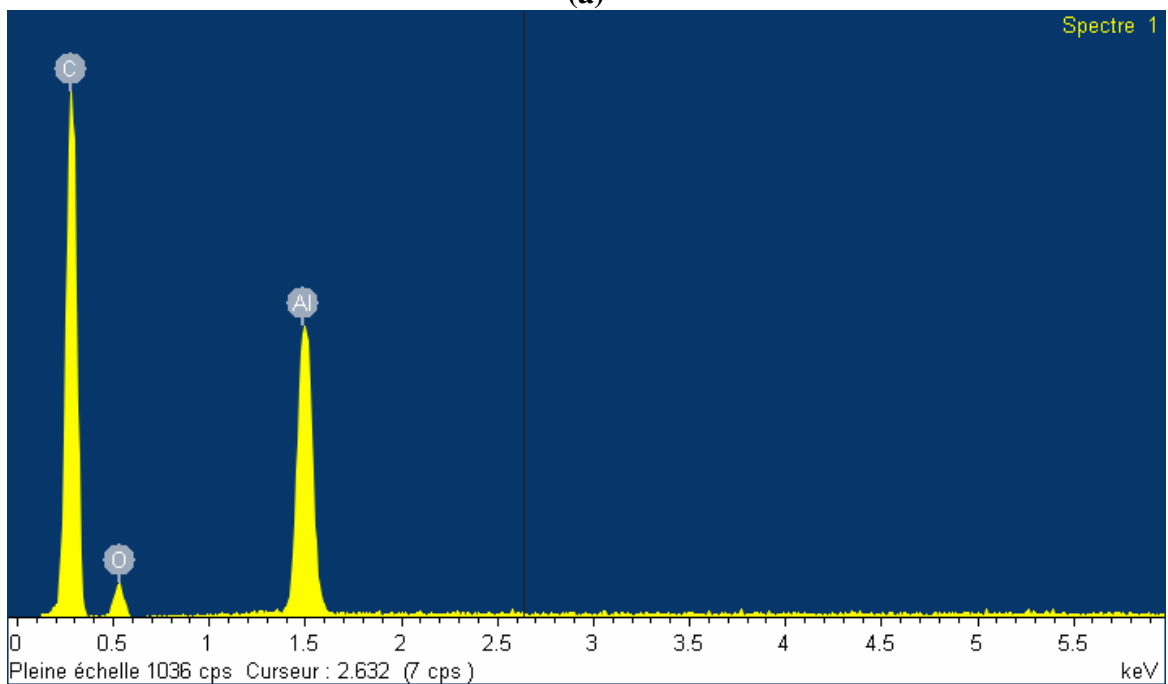
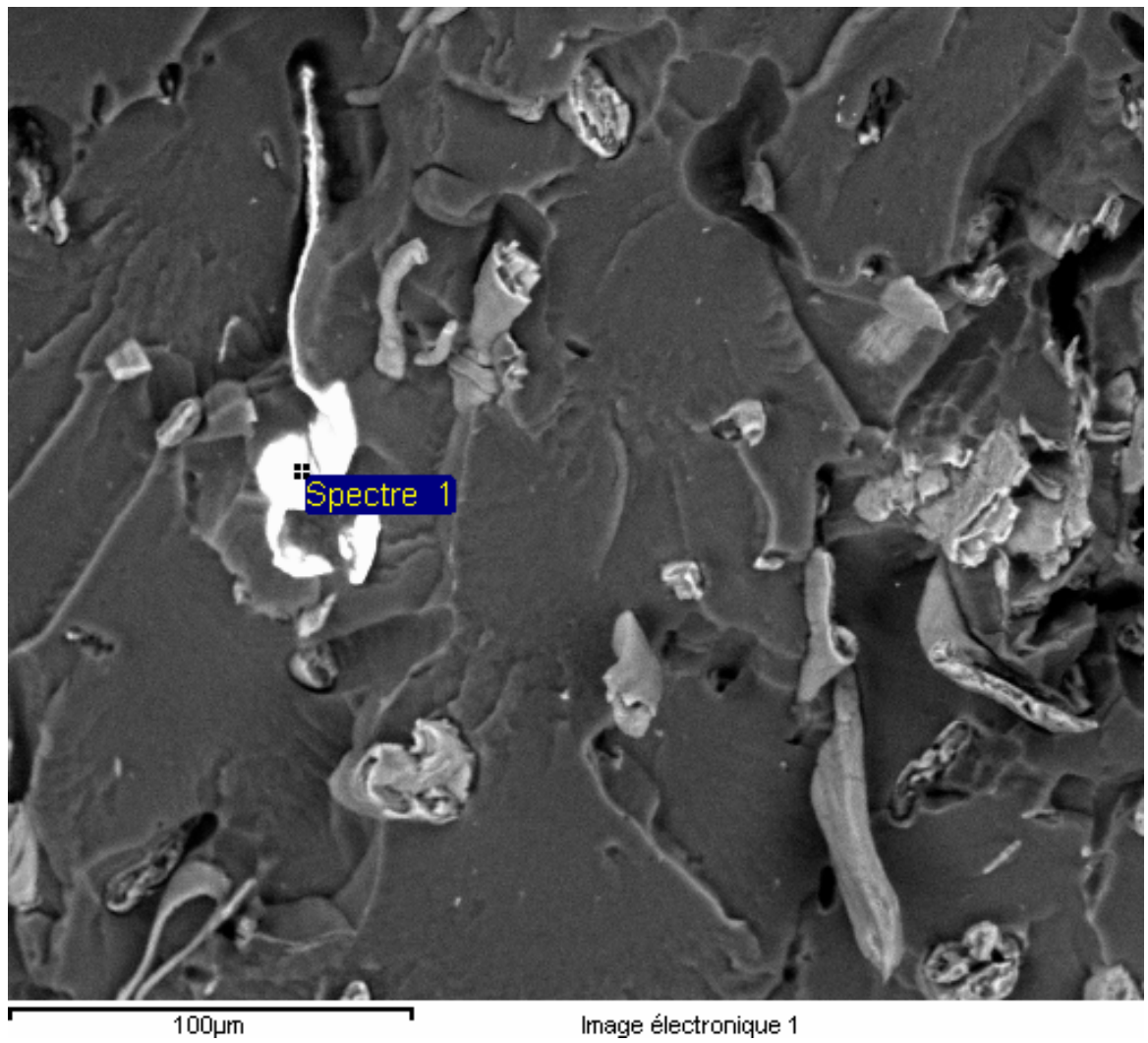


Figura 20: Micrografia da amostra com 30% de embalagem cartonada (a), análise EDS da área nomeada “Spectre 1” (b).

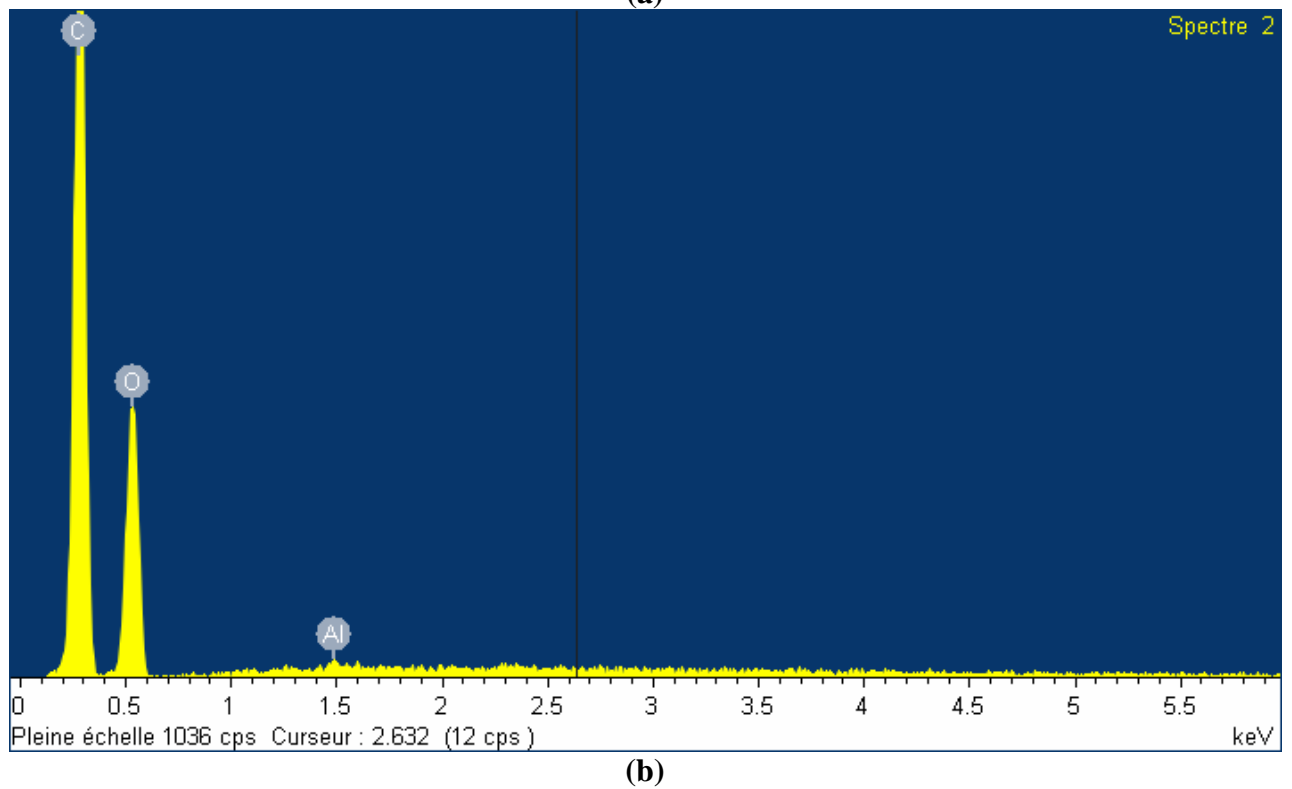
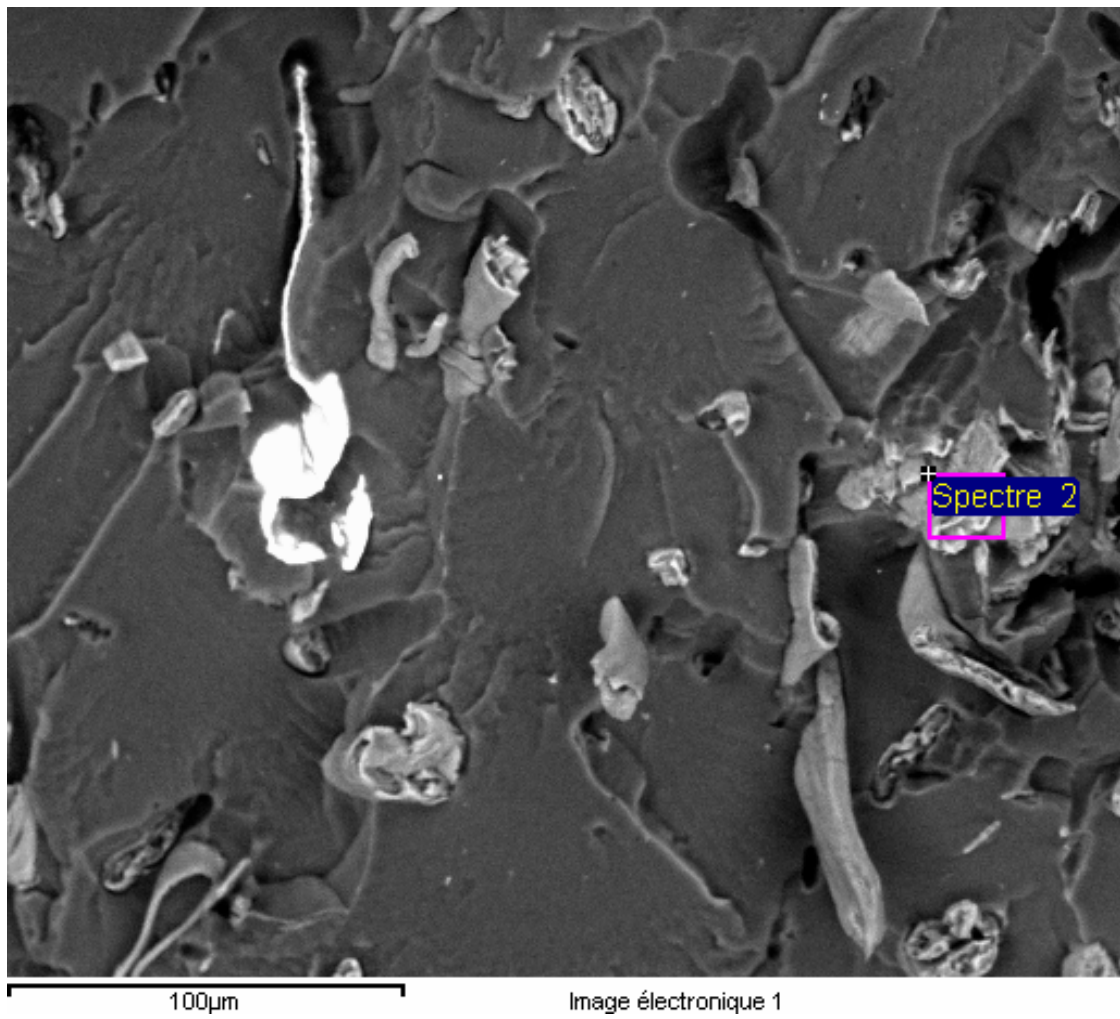


Figura 21: Micrografia da amostra com 30% de embalagem cartonada (a), análise EDS da área nomeada "Spectre 2" (b).

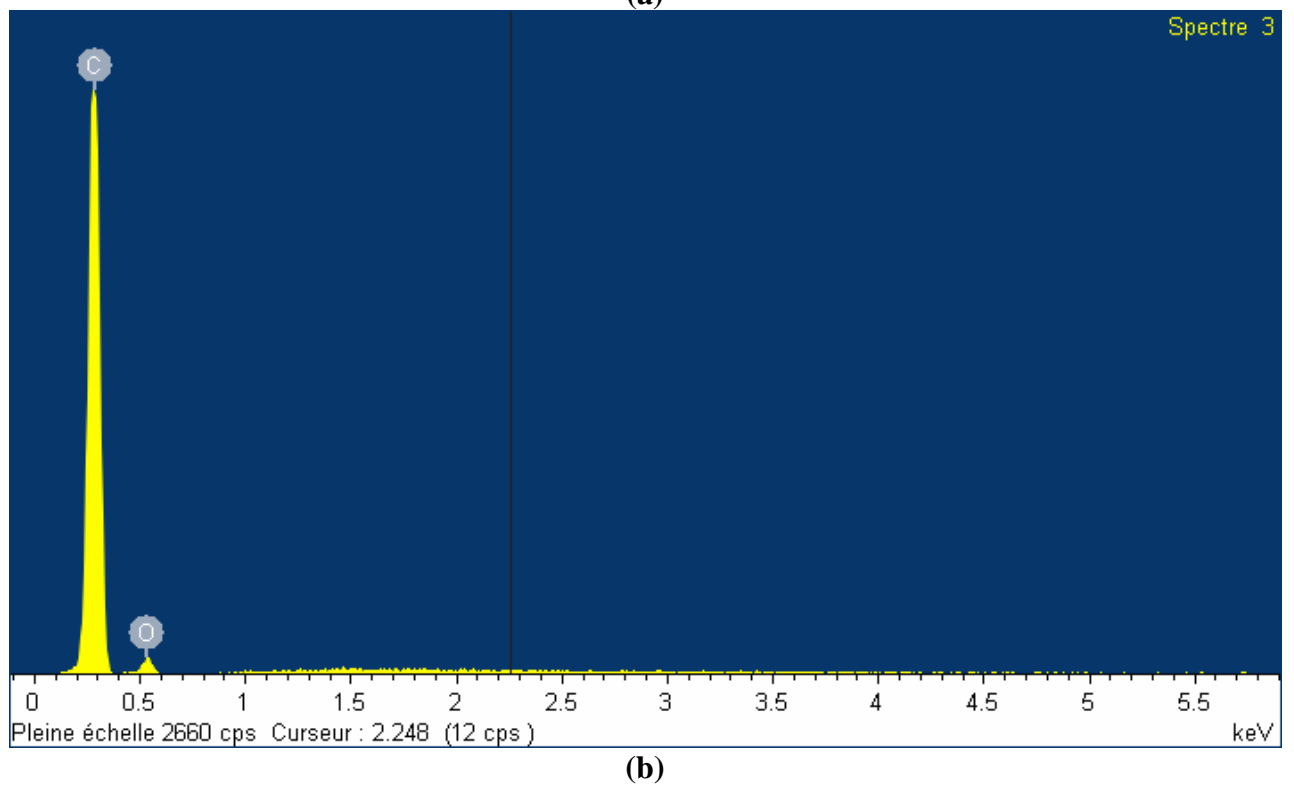
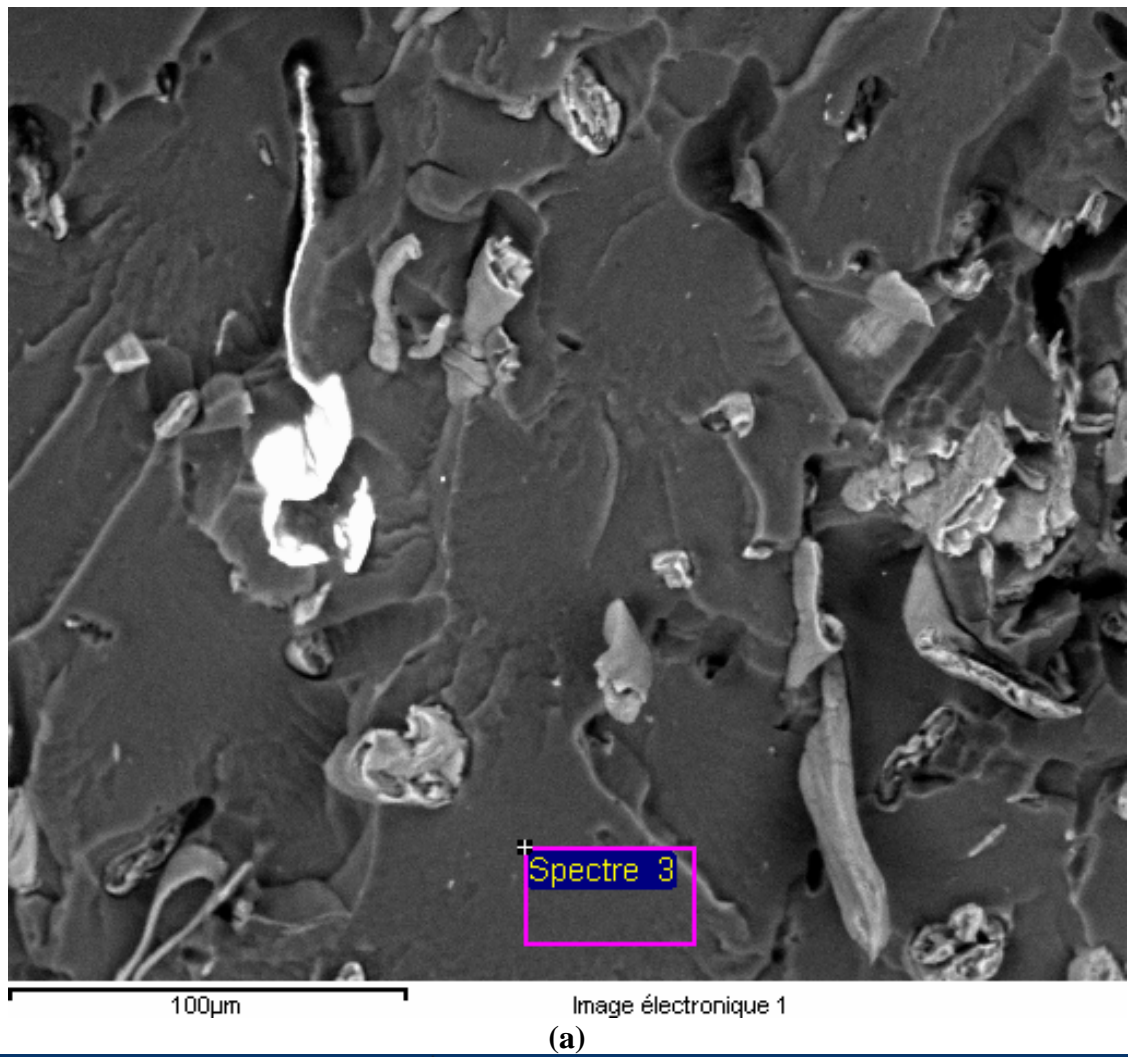


Figura 22: Micrografia da amostra com 30% de embalagem cartonada (a), análise EDS da área nomeada "Spectre 3" (b).

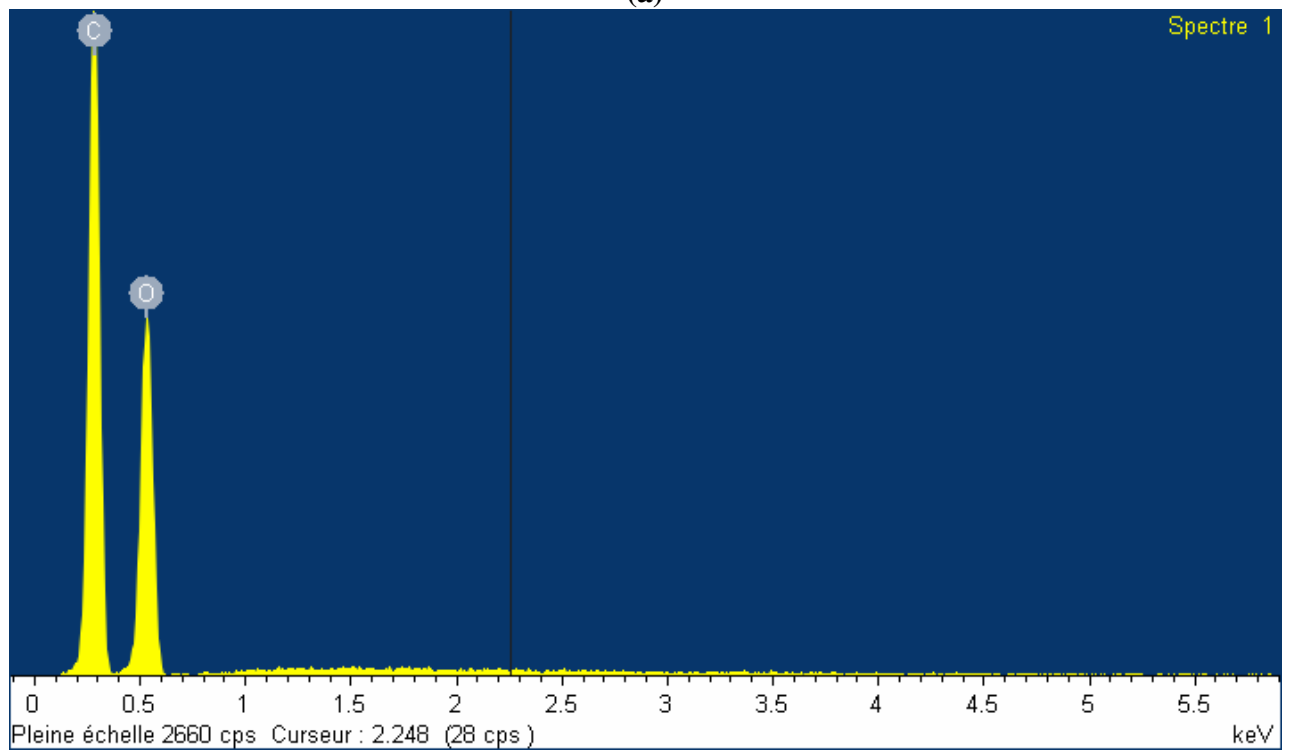
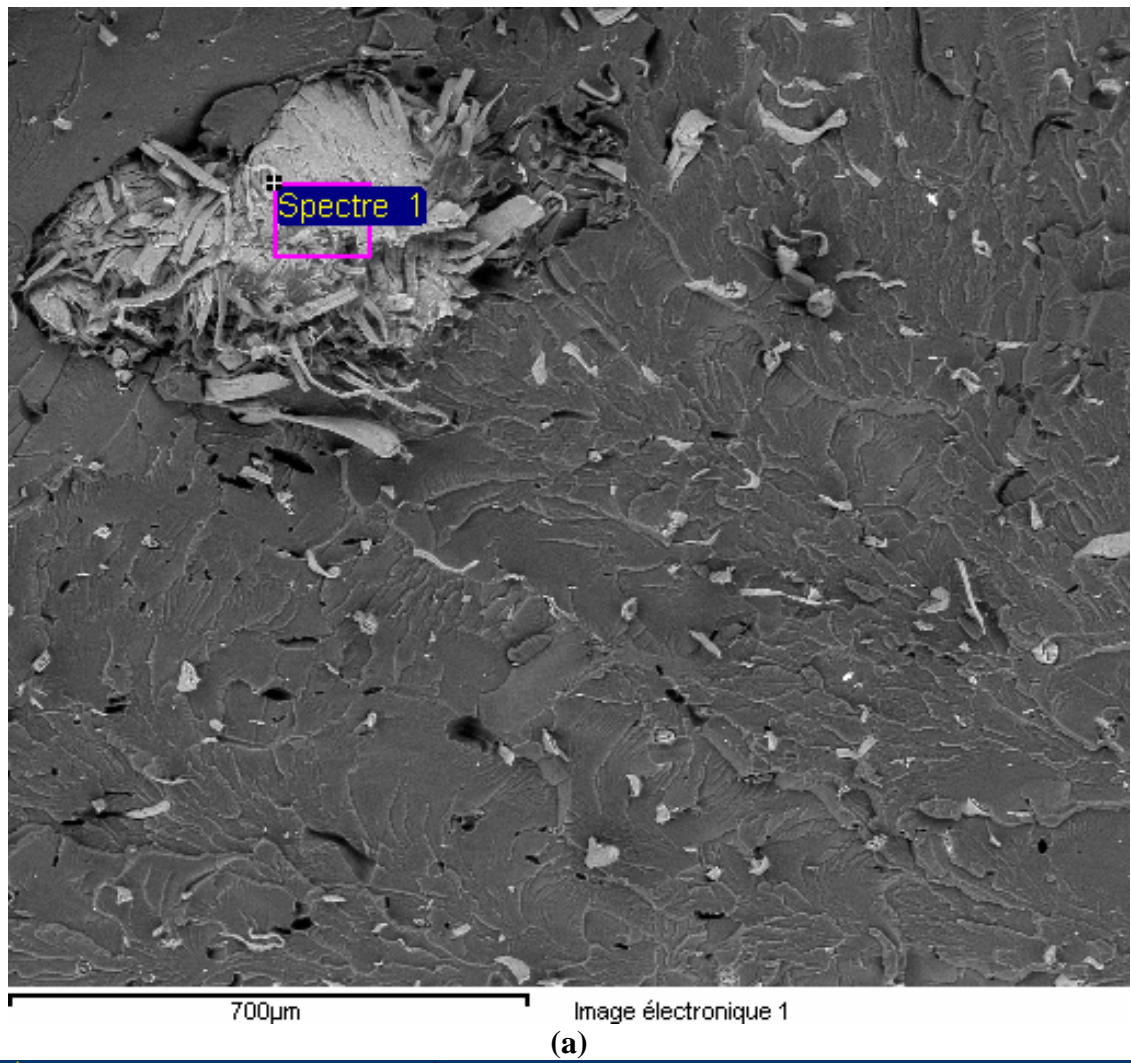
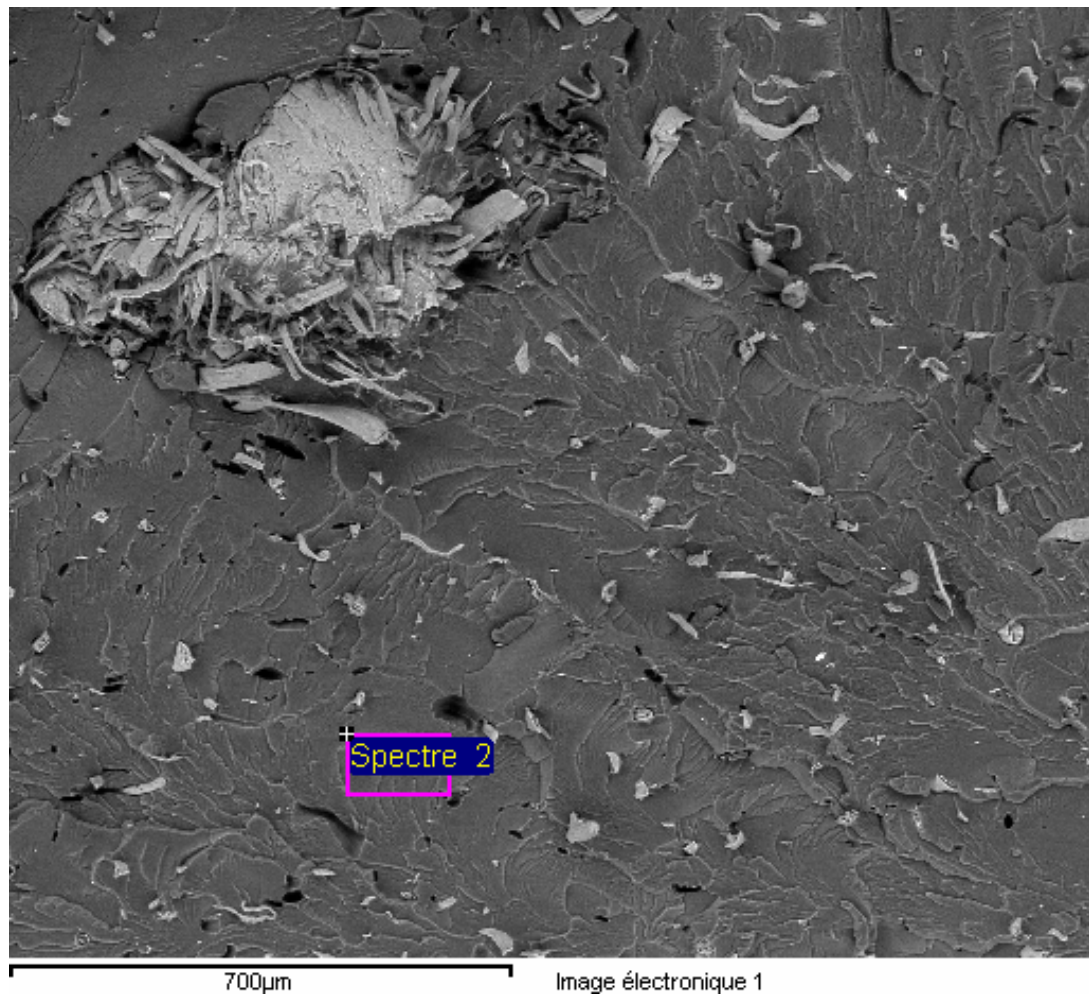
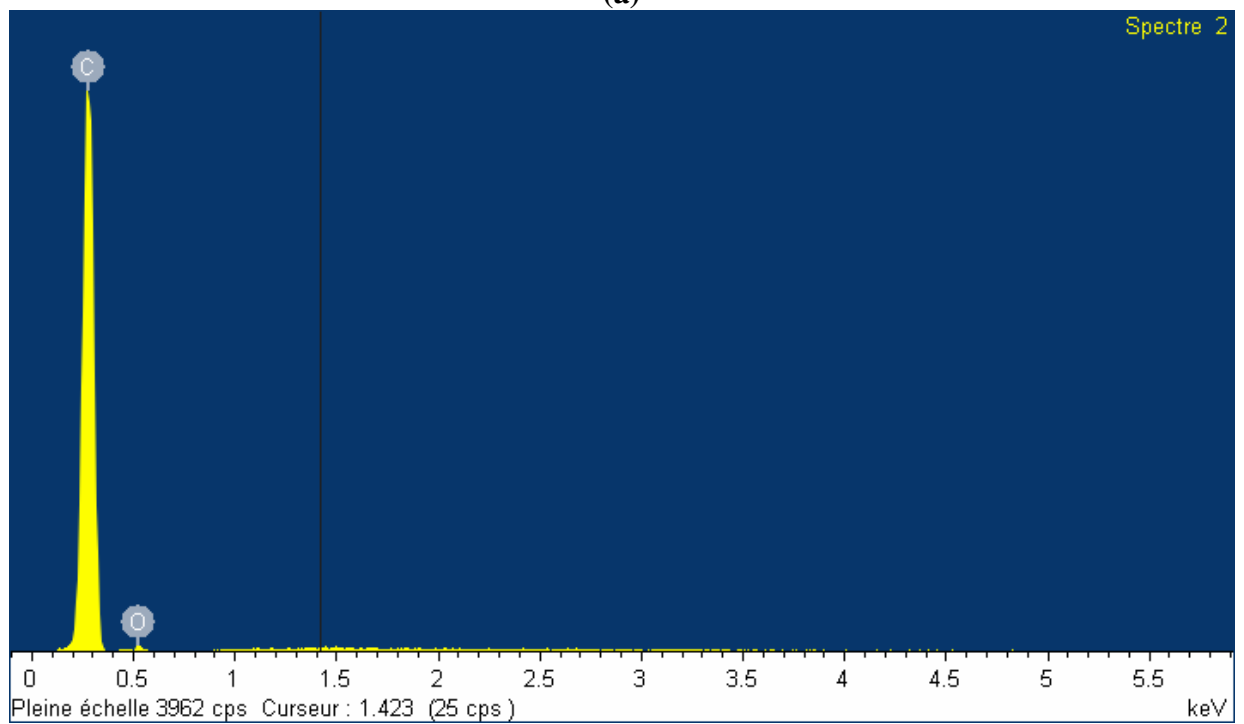


Figura 23: Micrografia da amostra com 10% de embalagem cartonada (a), análise EDS da área nomeada “Spectre 1” (b).



(a)



(b)

Figura 24: Micrografia da amostra com 10% de embalagem cartonada (a), análise EDS da área nomeada “Spectre 2” (b).

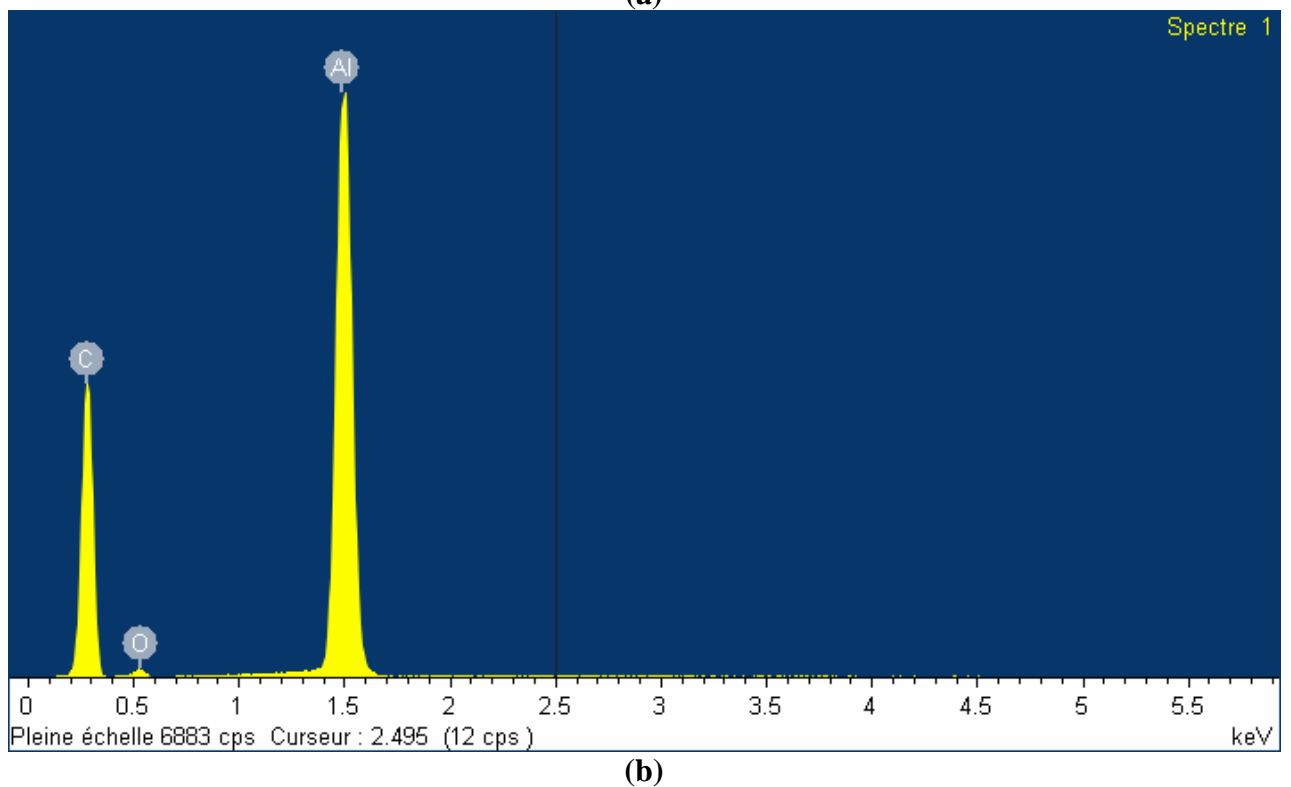
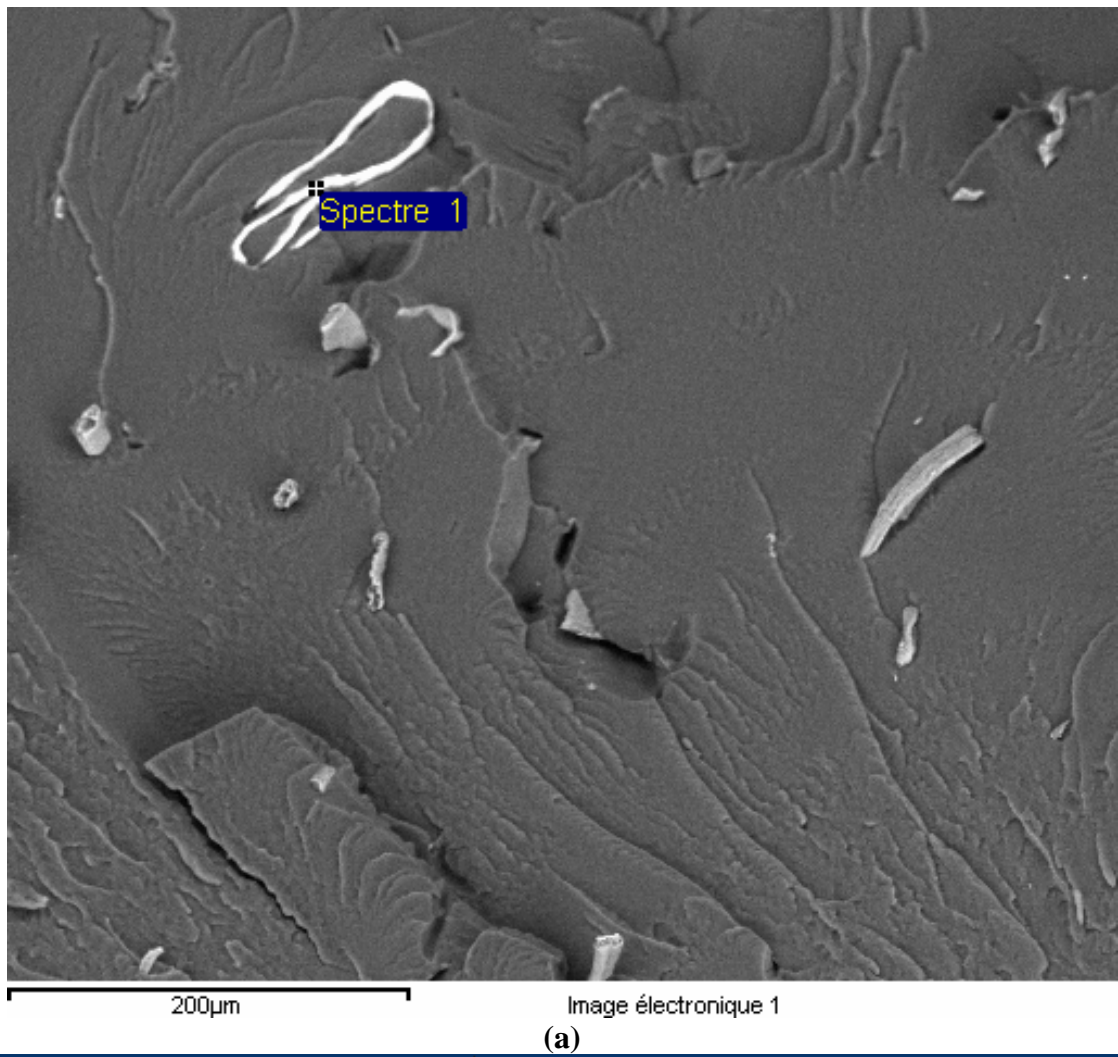


Figura 25: Micrografia da amostra com 5% de embalagem cartonada (a), análise EDS da área nomeada "Spectre 1" (b).

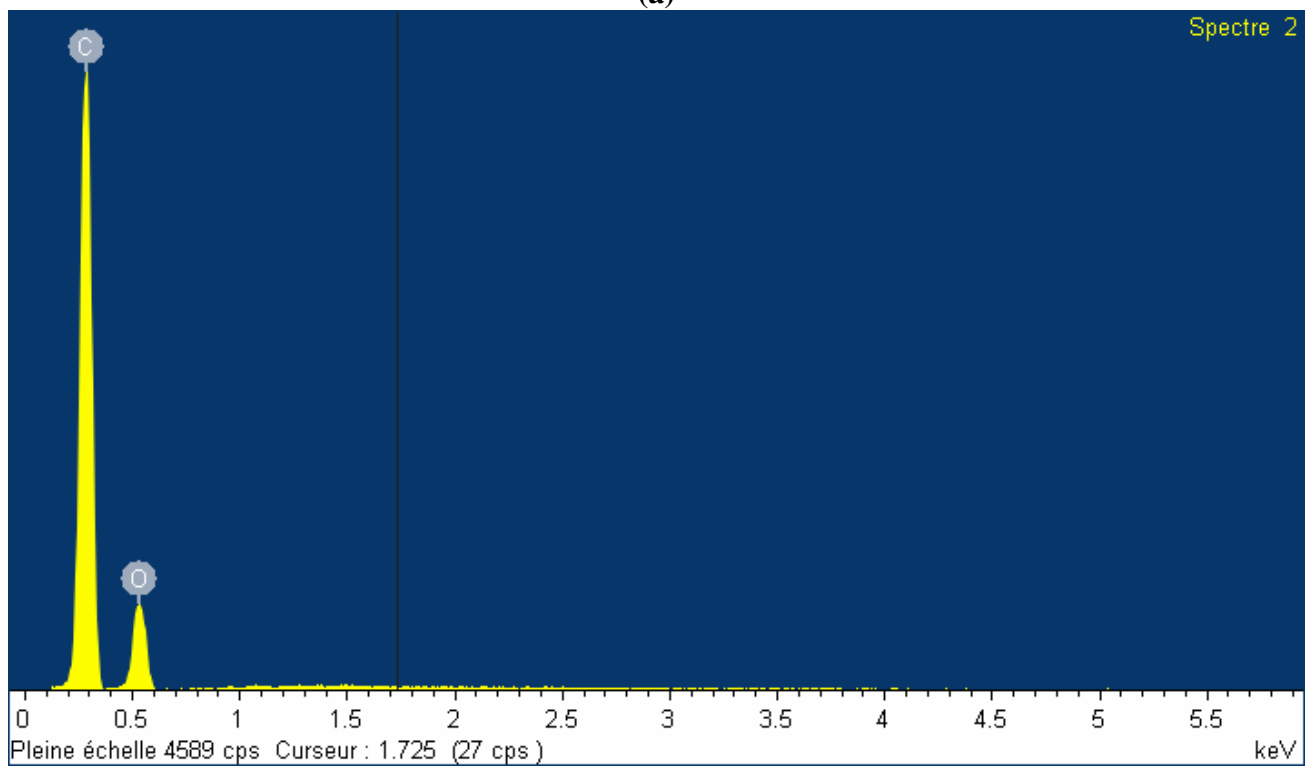
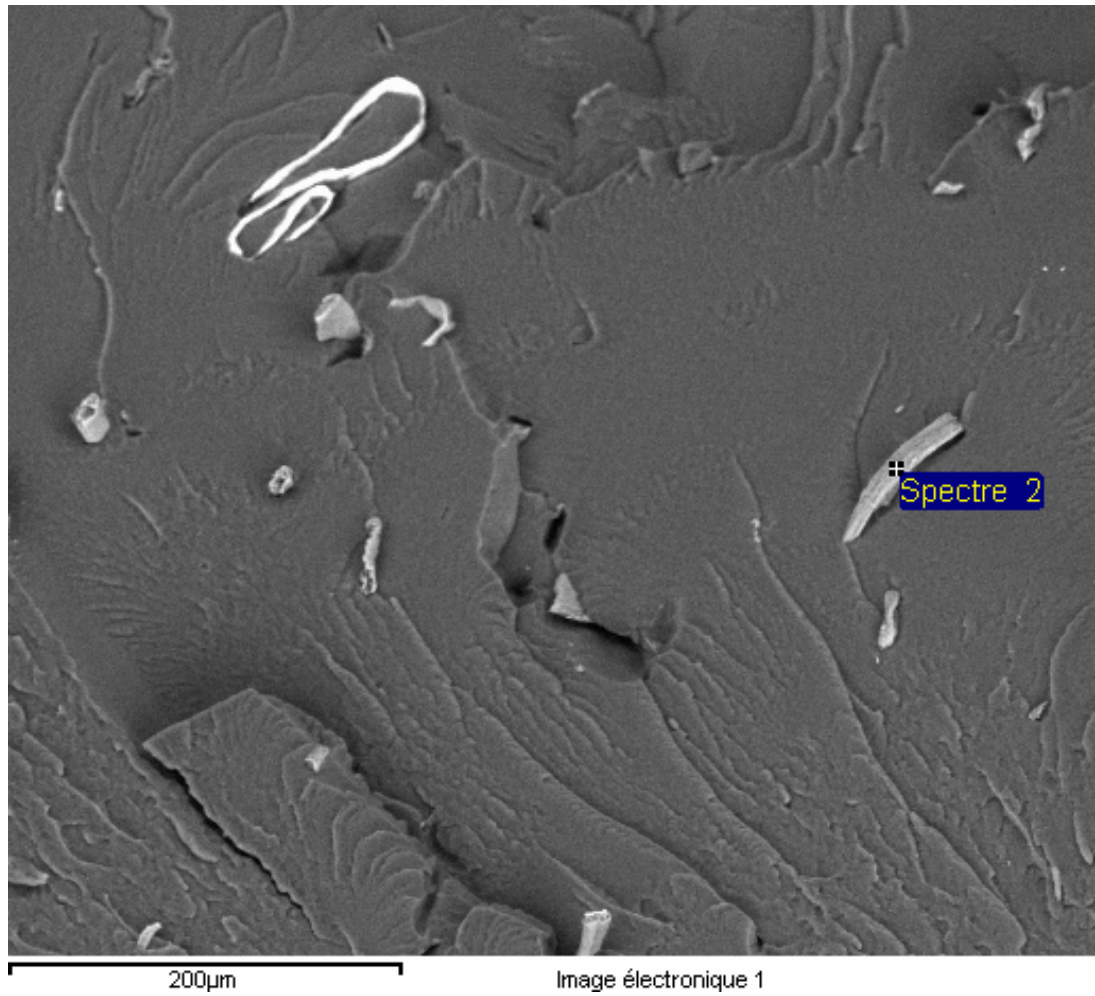
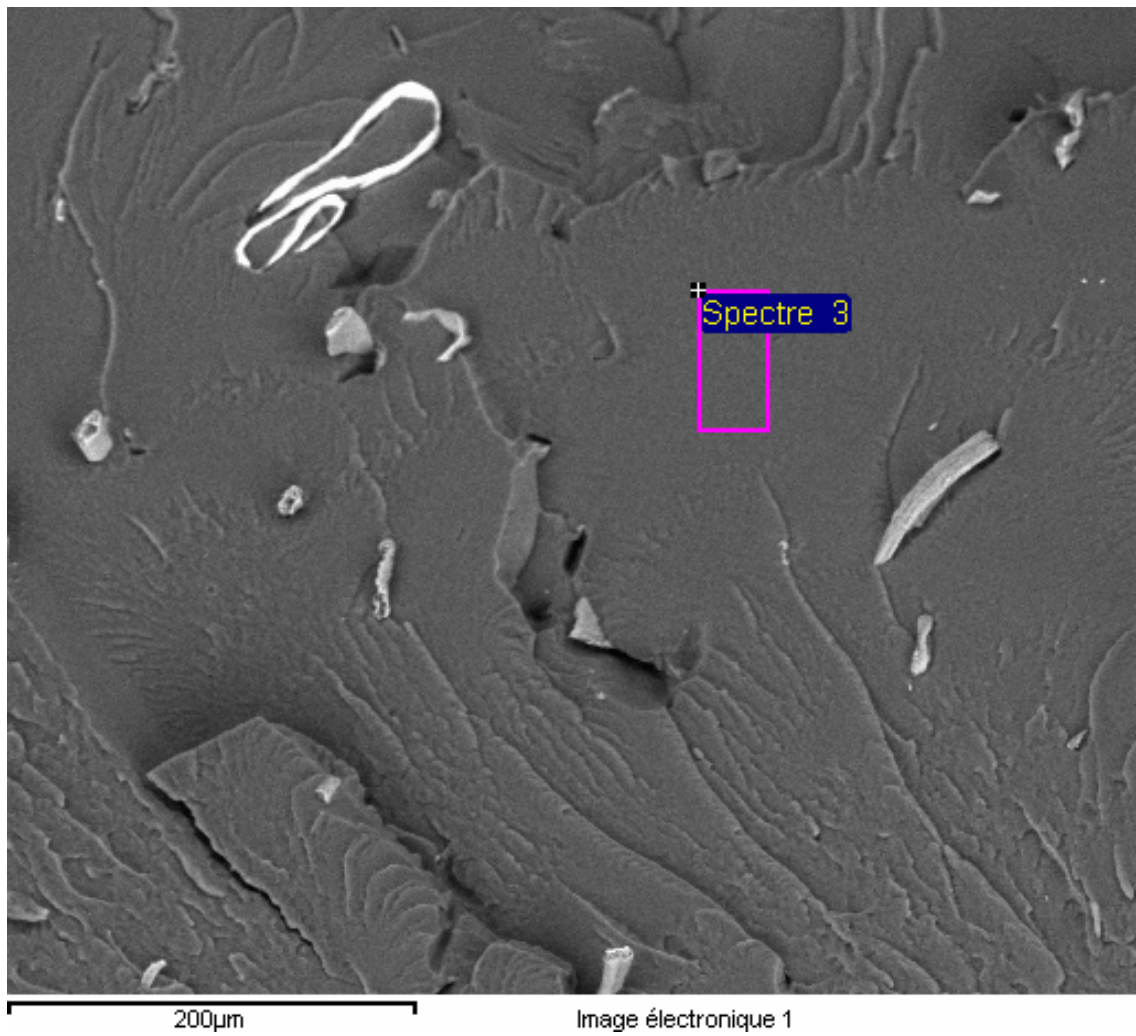
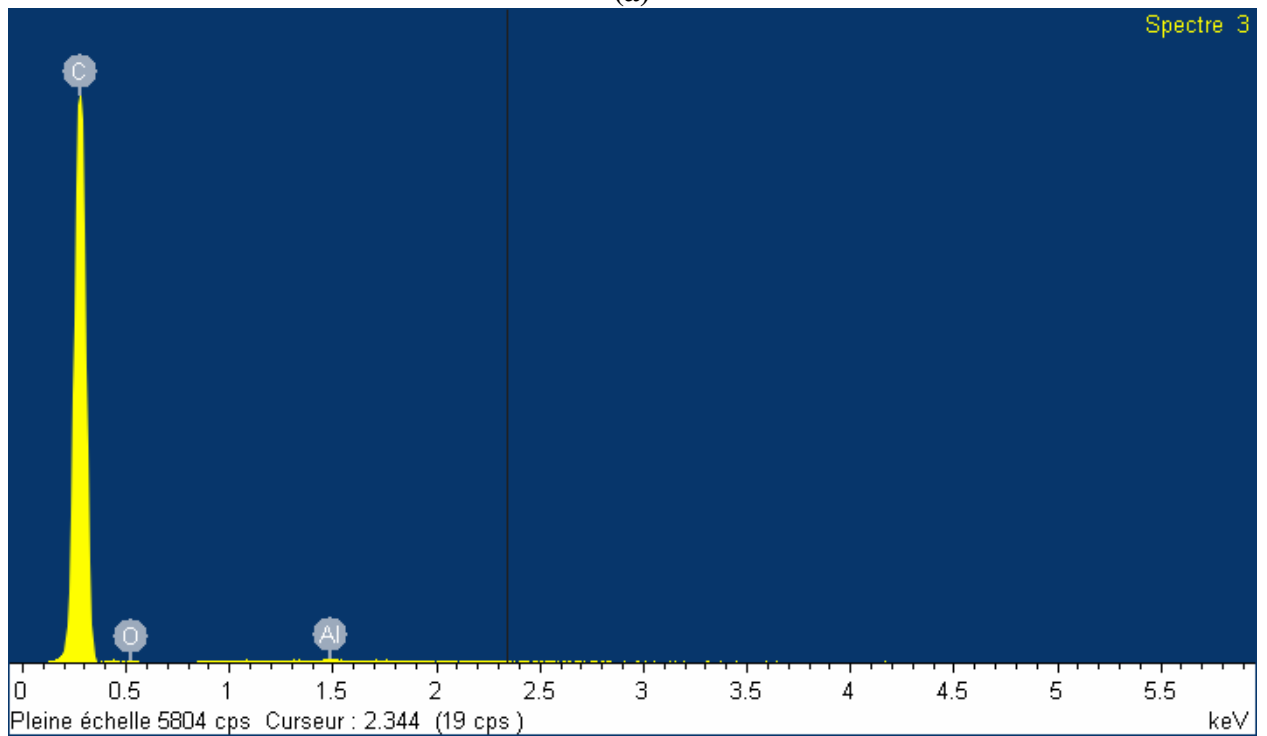


Figura 26: Micrografia da amostra com 5% de embalagem cartonada (a), análise EDS da área nomeada “Spectre 2” (b).



(a)



(b)

Figura 27: Micrografia da amostra com 5% de embalagem cartonada (a), análise EDS da área nomeada "Spectre 3" (b).

5.4. Análise de resultados de Índice de Fluidez

Os resultados dos ensaios para se determinar o índice de fluidez estão descritos na tabela 17.

Tabela 14: Resultados do ensaios de Índice de Fluidez

Ensaio	IF (g/10 min a 190°C)
0EC0B0P	5,24
0EC0B2P	4,20
0EC2B0P	4,30
0EC2B2P	4,50
5EC0B0P	1,39
5EC0B2P	2,01
5EC2B0P	1,88
5EC2B2P	2,67
10EC0B0P	1,12
10EC0B2P	1,10
10EC2B0P	1,33
10EC2B2P	0,84
20EC0B0P	0,54
20EC0B2P	0,91
20EC2B0P	0,55
20EC2B2P	0,63
30EC0B0P	0,62
30EC0B2P	0,71
30EC2B0P	0,44
30EC2B2P	0,71

Os resultados dos ensaios de MFI mostraram que para concentrações superiores a 5% embalagem cartonada, os valores caem consideravelmente, conforme esperado. Conforme se aumenta a concentração de reforço, o índice de fluidez diminui uma vez que a viscosidade é inversamente proporcional ao índice de fluidez. A adição de embalagem cartonada dificulta esse fluxo, pois a viscosidade representa a dificuldade das cadeias poliméricas em escorregar umas sobre as outras, conseqüentemente aumentando a viscosidade e reduzindo o índice de fluidez. Considerando os

resultados dos ensaios de MFI, algumas aplicações sugeridas para o compósito são:

- a) fabricação de embalagens para ovos;
- b) artefatos para jardinagem.

A Figura 28 mostra os resultados do índice de fluidez variando com o teor de embalagem cartonada.

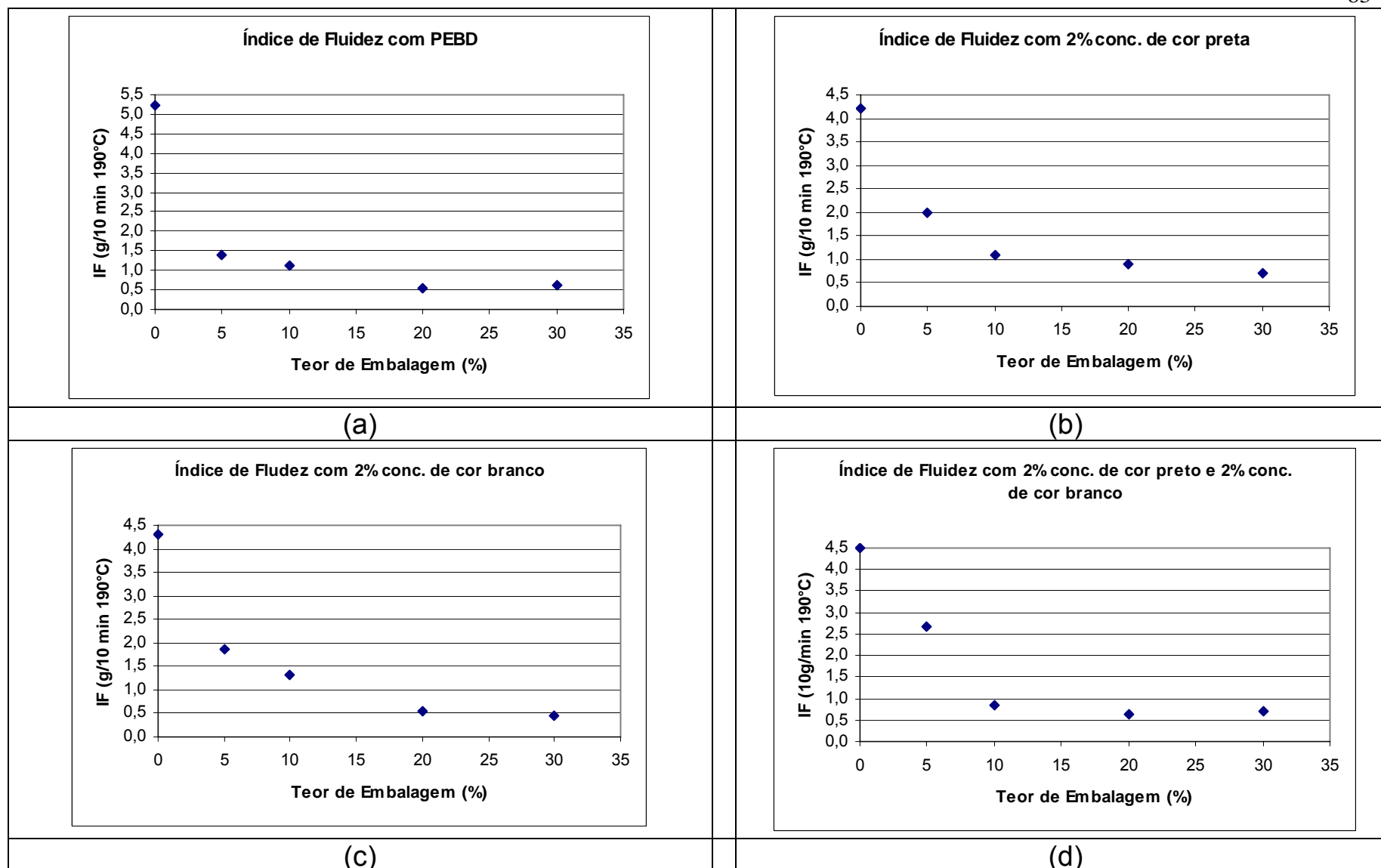


Figura 28: Índice de Fluidez em função do teor de embalagem para amostras (a) apenas com PEBD, (b) com 2% concentrado de cor preta, (c) com 2% concentrado de cor branco e (d) com 2% concentrado de cor preta e com 2% concentrado de cor branco.

5.5. Análise de Regressão Múltipla

A seguir são apresentados os resultados da análise estatística dos dados da avaliação mecânica dos corpos-de-prova. Para a análise, utilizou-se o software *Statgraphics Plus* versão 5.1 para Windows. Nesta etapa, analisou-se a influência de cada uma das variáveis independentes estudadas:

1. Teor de embalagem cartonada
2. Teor de concentrado de cor branco
3. Teor de concentrado de cor preto

Através da regressão múltipla estabeleceu-se um modelo polinomial que contempla a contribuição de cada uma das variáveis independentes citadas para o resultado final (as variáveis resposta), ou seja, as respostas mecânicas, chamadas de variáveis dependentes:

- a) Módulo de Elasticidade
- b) Tensão na Força Máxima
- c) Tensão de Ruptura
- d) Deformação na Tensão de Força Máxima
- e) Deformação na Tensão de Ruptura

Por meio do mesmo software, o modelo polinomial encontrado foi submetido a uma análise de variância.

5.5.1. Análise de Regressão Múltipla para o Módulo de Elasticidade

As análises citadas no item anterior foram realizadas para a variável dependente Módulo de Elasticidade, considerando-se o ajuste a um modelo polinomial do primeiro grau. Os resultados desta análise são apresentados nas Tabelas 15,16 e 17:

Tabela 15: Análise de Regressão Múltipla com as três variáveis independentes

Análise de Regressão Múltipla com as 3 variáveis independentes					
Variável Dependente: Módulo de Elasticidade					
Parâmetro	Estimativa	Desvio Padrão	Estatística T	Valor de P	
Constante	61,368	22,124	2,774	0,014	
Teor embalagem	6,450	0,973	6,628	0,000	
Teor concentrado branco	0,146	10,480	0,014	0,989	
Teor concentrado preto	1,03	10,479	0,099	0,923	
Análise de Variância					
Fonte	Soma de	Graus de Liberdade	Média	Razão	Valor P
Modelo	96520,0	3	32173,3	14,65	0,0001
Resíduo	35143,1	16	2196,44		
Total	131663,0	19			

$R^2 = 73,308 \%$

R^2 (ajustado para G.L.) = 68,3036 %

Tabela 16: Análise de Regressão Múltipla com as duas variáveis independentes

Análise de Regressão Múltipla com as 2 variáveis independentes					
Variável Dependente: Módulo de Elasticidade					
Parâmetro	Estimativa	Desvio Padrão	Estatística T	Valor de P	
Constante	61,5145	18,9028	3,2543	0,0047	
Teor embalagem cartonada	6,4494	0,9436	6,8322	0,000	
Teor concentrado preto	1,03	10,1668	0,1013	0,9205	
Análise de Variância					
Fonte	Soma de Quadrados	Graus de	Média	Razão F	Valor P
Modelo	96519,5	2	48259,8	23,34	0,0000
Resíduo	35143,5	17	2067,26		
Total	131663,0	19			

$R^2 = 73,308 \%$

R^2 (ajustado para G.L.) = 70,168 %

Tabela 17: Análise de Regressão Múltipla com uma variável independente

Análise de Regressão Múltipla com 1 variável independente

Variável Dependente: Módulo Elasticidade

Parâmetro	Estimativa	Desvio Padrão	Estatística T	Valor de P
Constante	62,545	15,492	4,037	0,0008
Teor de embalagem	6,449	0,918	7,028	0,000

Análise de Variância

Fonte	Soma de	Graus de Liberdade	Média	Razão F	Valor P
Modelo	96498,3	1	96498,3	49,40	0,0000
Resíduo	35164,7	18	1953,6		
Total	131663,0	19			

$$R^2 = 73,292 \%$$

$$R^2 \text{ (ajustado para G.L.)} = 71,808 \%$$

Uma vez que o nível de significância nas Tabelas 15, 16 e 17 de análise de variância é menor que 0,01 [**p** representa o erro do parâmetro ($p \leq 0,01$ ou $p \leq 1\%$)] existe um efeito estatisticamente significativo entre as variáveis com um nível de confiança de 99%.

O valor R^2 indica que o modelo conforme ajustado, explica 73,308% (para as regressões múltiplas com três e duas variáveis) e 73,292% (para a regressão múltipla com apenas uma variável) da variabilidade do módulo de elasticidade. A estatística R^2 (ajustado para G.L.) é o parâmetro que mostra o ajuste dos pontos obtidos com o modelo proposto, considerando-se o número de Graus de Liberdade (G.L.), e indica os valores 68,303%, 70,168% e 71,808% para as regressões múltiplas com três, duas e uma variável respectivamente.

Na Tabela 15, para determinar se o modelo pode ser simplificado, percebe-se que o menor valor de **p** nas variáveis independentes é 0,989, pertencente ao teor de concentrado de cor branco. Uma vez que valor de **p** é maior ou igual a 0,05 (equivale a dizer que o erro é maior que 5%), tal variável não é estatisticamente significativa com nível de 95% de significância. Conseqüentemente a variável teor de concentrado de cor branco pode ser retirada do modelo.

Na Tabela 16 o maior valor de p dentre as variáveis independentes é para o teor de concentrado de cor preto com 0,9205. Como esse valor é maior ou igual a 0,05, esta variável não é estatisticamente significativa, portanto, pode ser retirada do modelo.

Para essa análise a variável independente estatisticamente significativa é o teor de embalagem cartonada.

5.5.2. Análise de Regressão Múltipla para as demais variáveis dependentes

A mesma metodologia apresentada foi aplicada para as demais variáveis dependentes, e para todos os casos, as variáveis independentes “concentrado de cor branco” e “concentrado de cor preto” não mostraram uma influência considerada significativa para qualquer uma das variáveis dependentes analisadas (valores de p maiores que 5%). Tal fato conduziu à reduções seqüenciais (com eliminação das variáveis independentes) no modelo polinomial do primeiro grau para as variáveis dependentes.

6. CONCLUSÕES

Os resultados obtidos neste trabalho, nas condições de ensaio utilizadas, permitem concluir que:

1. É possível melhorar o aspecto visual do compósito pela adição de 2% de concentrado de cor branco (com TiO_2) e 2% de concentrado de cor preto (com Negro de Fumo) sem interferir nas avaliações mecânicas propostas neste trabalho
2. O teor ótimo determinado para incorporação de embalagem cartonada das propriedades mecânicas na matriz polimérica (Módulo de Elasticidade, Tensão na Força Máxima, Tensão na Ruptura, Deformação na Tensão Máxima e Deformação na Tensão de Ruptura) situa-se entre 20 a 25% p/p.
3. O compósito apresenta boa uniformidade morfológica para teores de 5% de reforço (embalagem cartonada) baseadas nas análises de micrografia eletrônica de varredura.
4. A adição de embalagem cartonada ao PEBD reduz o índice de fluidez a partir de 5% de embalagem cartonada.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] LUND, H. F. Recycling Handbook, Second Edition, New York: The Mc Graw – Hill, 2001. 500 p.
- [2] ZANIN, Maria, MANCINI, Sandro D. Resíduos Plásticos e Reciclagem: Aspectos gerais e tecnologia. 1º edição. São Carlos: Editora da Universidade Federal de São Carlos: EduFSCar, 2004, v 1, capítulo 1. pp 15 – 28.
- [3] DEMAJOROVIC, J. **Da política tradicional de tratamento do lixo à política de gestão de resíduos sólidos.** Revista de Administração de Empresas, v. 35, n. 3, p. 88-93, 1995.
- [4] MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. São Paulo. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/port/conama/res/res01/res27501.html>> Acesso em: 14 jul. 2006.
- [5] CONSUMIDOR É QUEM DITA. **Packstar Embanews**, São Paulo, pp 22-31, 1998.
- [6] IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Pesquisa nacional de saneamento básico de 2000. Rio de Janeiro. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br>> Acesso em: 27 maio 2002.
- [7] CEMPRE – Compromisso Empresarial para Reciclagem. São Paulo. Disponível em: <<http://www.cempre.org.br>> Acesso em 25 abril 2006.
- [8] Sebrae/RJ – Serviço de Apoio às Micro e Pequenas Empresas no Estado do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro. Disponível em: <<http://www.sebraerj.com.br>> Acesso em: 04 abril 2005.
- [9] CEMPRE – Compromisso Empresarial para Reciclagem. São Paulo. Disponível em: <<http://www.cempre.org.br>> Acesso em: 04 set. 2006.
- [10] PEDELHES, G. J; **Embalagem:** Funções e Valores na Logística. GELOG – UFSC: Grupo de Estudos Logísticos Universidade Federal de Santa Catarina. pp 1-6, 2005.
- [11] MOURA, R. A.; BANZATO J. M. **Embalagem Unitização & Containerização.** IMAM, São Paulo, 2000.
- [12] BOWERSOX, D. J.; CLOSS D. J. **LOGÍSTICA EMPRESARIAL:** O processo de Integração da Cadeia de Suprimento. Ed. Atlas, São Paulo, 2001.
- [13] HANLON, J. F. **Handbook of package engineering.** New York: McGraw-Hill, pp 1-20, 1971.

- [14] CABRAL, A.C.D. Polímeros Sintéticos. **Embalagens para produtos alimentícios**, São Paulo: SICCT, s.d. pp187-240.
- [15] CABRAL, A.C.D. Laminados Flexíveis. **Embalagens para produtos alimentícios** São Paulo: SICCT, s.d. pp294-305.
- [16] ALCAN ALUMICIO DO BRASIL S.^a **Divisão de Embalagens Flexíveis. Portfólio**. Mauá: Alcan, 1997.
- [17] THE DOW CHEMIACAL COMPANY. Disponível em: <<http://plastics.dow.com/plastics/la/port/prod/saran/>> Acesso em: 28 nov. 2006.
- [18] SETOR1.COM. Disponível em: <http://www.setor1.com.br/embalagens/e_voh.htm> Acesso em: 25 nov. 2006.
- [19] ABIPET. Associação Brasileira da Indústria do PET. Disponível em: <<http://www.abepet.com.br/oqepet.php>> Acesso em: 28 nov. 2006.
- [20] EMBALA BRASIL. Caderno de Ecoeficiência por Fernando Neves. Disponível em: <<http://www.embalabrasil.com.br/tetra.htm>> Acesso em: 26 set. 2003.
- [21] Tetrapak do Brasil. Disponível em <<http://www.tetrapak.com.br>> Acesso em: 03 nov. 2004.
- [22] NEVES, F. L Efeito da Interação entre fibras virgens e recicladas nas características físicas de cartões multifolhados. Piracicaba, 1996. 48p.
- [23] BREMER, W. P. Films, polyethylene, low – and high-density. **Packaging encyclopedia and yearbook**, v.32, n. 5, pp 43-44, 1987. Denver.
- [24] HANLON, J. F. **Handbook of package engineering**. New York: McGraw-Hill, 1971. 1v. pp 3-56.
- [25] CALLISTER Jr. W D. **Materials Science and Engineering: an Introduction**. 4th. Edition, New York: John Wiley & Sons, Inc. 1996; pp. 510-513.
- [26] CALLISTER Jr. W D. **Ciência e Engenharia dos Materiais: uma Introdução**. 5^o Edição, Rio de Janeiro: LTC – Livros Técnicos e Científicos Editora S.A, 2002; pp 360-362.
- [27] CALLISTER Jr. W D. **Ciência e Engenharia dos Materiais: uma Introdução**. 5^o Edição, Rio de Janeiro: LTC – Livros Técnicos e Científicos Editora S.A, 2002; pp 363-366.
- [28] CALLISTER Jr. W D. **Ciência e Engenharia dos Materiais: uma Introdução**. 5^o Edição, Rio de Janeiro: LTC – Livros Técnicos e Científicos Editora S.A, 2002; pp 368-370.

[29] CALLISTER Jr. W D. **Ciência e Engenharia dos Materiais: uma Introdução**. 5ª Edição, Rio de Janeiro: LTC – Livros Técnicos e Científicos Editora S.A, 2002; pp 371-374.

[30] AMERICAM STANDARDS FOR TESTING MATERIAIS. **ASTM D638**: Standard methods of evaluating tensile properties for plastics. Philadelphia, 2000.

[31] AMERICAM STANDARDS FOR TESTING MATERIAIS. **ASTM D3039**: Standard test method for tensile properties of polymer matrix composite materials. Philadelphia, 2000.

[32] CALLISTER Jr. W D. **Ciência e Engenharia dos Materiais: uma Introdução**. 5ª Edição, Rio de Janeiro: LTC – Livros Técnicos e Científicos Editora S.A, 2002; pp 375 - 380.

[33] von ZUBEN, F. Tetra Pak; Artigos Técnicos da Tetra Pak: **Reciclagem de Embalagens LONGA VIDA – TETRA PAK**. Desenvolvimento Ambiental. 1996 pp 5-6

[34] NEVES, F. Tetra Pak; Artigos Técnicos da Tetra Pak: **Reciclagem de embalagens CARTONADAS TETRA PAK**. Desenvolvimento Ambiental. 1999 pp 7-14

[35] Von ZUBEN, F, NEVES, F. Artigos Técnicos da Tetra Pak: **Reciclagem do alumínio e polietileno presente nas embalagens cartonadas TETRA PAK**. 1999 pp 15-17

[36] KLABIN. Disponível em: http://www.klabin.com.br/br/conquistaspremiacoes_1217.asp Acesso em: 02 set. 2006.

[37] Reciclado de cartones para bebidas: aglomerado (TECTAN). Disponível em <http://cartonbebidas.com/08.html>> Acesso em 05 out. 2003.

[38] CERQUEIRA, M. H de. Artigos Técnicos da Tetra Pak: **Placas e Telhas produzidas a partir da reciclagem do polietileno/alumínio presentes nas embalagens Tetra Pak**. Engenheiro de Desenvolvimento Ambiental – Tetra Pak.

[39] NARDIN, M. **Revue des composites et des matériaux avances**, v. 16, n. 1, pp. 49-62, 2006.

[40] BUSNEL, F. ERIC, B. BAILEY, C. GROHENS, Y. **Revue des composites et des matériaux avancés**, v. 16, n. 1pp.75-87, 2006.

- [41] SÈBE, G. **Revue des composites et des matériaux avancés**, v. 16, n. 1, pp. 89-100, 2006.
- [42] BRÉARD, J. BIZET, L. MONTRAY, N. BALEY, C. **Revue des composites et des matériaux avancés**, v. 16, n. 1, pp.101-103, 2006.
- [43] GOUANVÉ, F. MARAIS, S. MÉTAYER, M. MORVAN, C. PONCIN-EPAILLARD, F. **Revue des composites et des matériaux avancés**, v.16, n. 1, pp. 115-128, 2006.
- [44] NECHWATAL A. et al., The Effect of Different Cellulose Fibers in Rubber. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ECO-COMPOSITES. 3rd., June 20 and 21st, 2005. Stockholm Sweden. Royal Institute of Technology.
- [45] GROZDANOV, A. et al., Recyclable Polypropylene/Paper Composites. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ECO-COMPOSITES. 3rd., June 20 and 21st, 2005. Stockholm Sweden. Royal Institute of Technology.
- [46] COLOMB, X, et al., Effects of Different surface treatments on the interface of HDPE/ Reused type composites. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ECO-COMPOSITES. 3rd., June 20 and 21st, 2005. Stockholm Sweden. Royal Institute of Technology.
- [47] MURATHAN A. et al., Manufacturing low density boards from waste cardboards containing aluminium. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ECO-COMPOSITES. 3rd., June 20 and 21st, 2005. Stockholm Sweden. Royal Institute of Technology.
- [48] NISHINO, T. and ARIMOTO, N., All-cellulose composite by partial dissolving of fibers. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ECO-COMPOSITES. 3rd., June 20 and 21st, 2005. Stockholm Sweden. Royal Institute of Technology.
- [49] DUCHEMIN, B. and STAIGER, M., Wood fiber reinforced cellulosic matrix. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ECO-COMPOSITES. 3rd., June 20 and 21st, 2005. Stockholm Sweden. Royal Institute of Technology.
- [50] NEAGU, R. C, et al. The effect of different wood species and pulping process on the reinforcement of wood fibre/thermoset composites. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ECO-COMPOSITES. 3rd., June 20 and 21st, 2005. Stockholm Sweden. Royal Institute of Technology.
- [51] PEIJS, T., All-polimers composites. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ECO-COMPOSITES. 3rd., June 20 and 21st, 2005. Stockholm Sweden. Royal Institute of Technology.
- [52] BOGOEVA-GACEVA, G, et al. Eco-friendly polymer composites based on polypropylene and kenaf fibers. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ECO-COMPOSITES. 3rd., June 20 and 21st, 2005. Stockholm Sweden. Royal Institute of Technology.

- [53] GEOGORPOULOS, S. Th, et al. Thermoplastic polymers reinforced with fibrous agricultural residues. **Polymer Degradation and Stability**, v 90, pp 302 – 312. 2005
- [54] JACOB M, et al. Mechanical properties of sisal/oil plam hybrid fiber reinforced natural rubber composites. **Composites Science and Technology**, v 64, pp 955-965. 2004.
- [55] KARMARKAR, A, et al. Mechanical properties of wood-fiber reinforced polypropylene composites: Effect of a novel compatibilizer with isocyanate functional group. **Composites Part A: applied science and manufacturing**, 2006.
- [56] DOAN, T. T, et al. Jute/polypropylene composites I. Effect of matrix modification. **Composite Science and Technology**, v 66, pp. 953-963, 2006.
- [57] STAEL, G.C, et al. Impact behavior of sugarcane bagasse wast-EVA composites. **Polymer Testing**, v 20, pp. 869-872, 2001.
- [58] ABU-SHARKH, B. F, et al, Degradation study of date palm fibre/polypropylene composites in natural and artificial weathering: mechanical and thermal analysis. **Polymer Degradation and Stability**, v 85 pp 967-973, 2004.
- [59] KUMAR, A. P, et al. Degradability of composites, prepared from ethylene-propylene copolymer and jute fiber under accelerated aging and biotic environments. **Materials Chemistry and Physics**, v 92, pp. 458-469, 2005.
- [60] HUDA, M. S., et al. Chopped glass and recycled newspaper as reinforcement fibers in injection molded poly(lactic acid) (PLA) composites: A comparative study. **Composite Science and Technology**, v 65, pp. 1813-1824, 2005.
- [61] BRAHMAKUMAR, M., et al. Coconut fibre reinforced polyethylene composites: effect of natural waxy surface of the fibre on fibre/matrix interfacial bonding and strength of composites. **Composite Science and Technology**, v 66, pp. 1813-1824, 2006.
- [62] JOSHI, S. V., et al. Are natural fiber composites environmentally superior to glass fiber reinforced composites? **Composites Part A: applied science and manufacturing**, v35, pp. 371-376, 2004.
- [63] SPIEGEL, M. R., **Estatística**; 3° edição, São Paulo: MAKRON Books, 1994. Cap 18.
- [64] BONDUELLE, G. M., Aplicação do planejamento de experimentos no controle da fabricação de chapas de fibra de madeira. Disponível em <<http://www.dcf.ufpa.br/cerne/Revistav6n2-2000/1-ARTIGO.doc>> Acesso em 25 mar. 2002.

[65] BOX, G. E. P.; HUNTER, W. G.; HUNTER, J. S., **Statistics for Experimenters**, New York: John Wiley & Sons, Inc., 1978.

[66] ANDERSON, V. L.; McLEAN, R. A. **Design of Experiments: A Realistic Approach**, New York: Marcel Dekker, Inc., 1974.

8. ANEXO A

8.1. Planejamento estatístico – projeto fatorial

As técnicas de análise de variância são empregadas após se obterem os resultados de um experimento. Todavia, a fim de se obter a maior quantidade possível de informação ao menor custo (leia-se como menor número possível de ensaios), o esquema do experimento deve ser cuidadosamente planejado com antecedência [63]. Esta preparação é conhecida como o planejamento de experimentos.

Segundo BONDUELLE [64], a utilização do planejamento de experimentos pode contribuir com o desenvolvimento industrial pela otimização das grandezas de interesse, da determinação dos fatores influentes sobre essas grandezas, eventualmente das suas interações, e pela minimização dos efeitos da variabilidade sobre o desempenho de um processo ou de um produto. Este planejamento permite ao experimentador melhorar o desempenho dos produtos e processos, atenuar a sensibilidade de seus elementos a fatores que não podem ser controlados e reduzir os custos de desenvolvimento e de fabricação.

O planejamento de experimento possui como principais vantagens:

- diminuir do número de ensaios;
- estudo de um número considerável de fatores;
- detecção das interações entre fatores;
- detecção dos níveis ótimos;
- melhoria da precisão dos resultados;
- otimização dos resultados.

O planejamento de experimentos consiste no estudo dos métodos da amostragem e dos problemas correlatos que surgem. Seu princípio básico permite variar de uma só vez todos os níveis de todas as variáveis, discretas

ou contínuas (chamada de fatores) a cada experiência, de maneira programada e racional.

Segundo BOX [65] e ANDERSON [66], as etapas para a execução/análise de um projeto fatorial são as seguintes:

a.) Escolha das variáveis independentes cujos efeitos sobre as variáveis dependentes deseja-se conhecer e quantificar. Deve-se também nessa etapa, com base em informações prévias (se disponíveis), definir o domínio de estudo das variáveis estudadas.

b.) Definição do número de níveis, que podem ser quantitativos ou qualitativos, que devem ser assumidos pelas variáveis independentes. O número de níveis juntamente com o número de variáveis define o número de ensaios a se realizar. Considerando o número de variáveis x e o número de níveis n , o número de ensaios é determinado pela expressão:

$$n^{\circ} \text{ ensaios} = n^x$$

c.) Uma vez definido o número de ensaios a se realizar, inicia-se a montagem da matriz de ensaios. Nela, todas as variáveis independentes assumem todos os níveis possíveis.

d.) A última etapa é a randomização dos ensaios, para minimizar a influência de algum fator desconhecido que tem influencia sobre as variáveis dependentes.

e.) Uma vez obtido os resultados dos ensaios, a próxima etapa é a análise dos resultados obtidos para as respostas (variáveis dependentes). Essa análise inicia-se pela regressão polinomial, que é uma forma de quantificar o efeito de cada uma das variáveis. Esse efeito pode ser mostrado através de uma equação polinomial, onde a variável dependente aparece com função da contribuição de cada uma das variáveis independentes.

f.) O modelo obtido pela regressão polinomial é então analisado pela Análise de variância. Essa ferramenta indica o quanto o modelo está ajustado aos valores reais obtidos nos ensaios.

g.) Dependendo do objetivo do trabalho, o universo de trabalho das variáveis pode ser otimizado e uma nova etapa do planejamento de experimentos se inicia.

Uma outra parte bastante importante do planejamento e da análise de experimentos é a regressão polinomial ou análise de regressão múltipla, seguida da análise de variância. Através dessa análise de regressão múltipla, chega-se a uma equação polinomial onde cada uma das variáveis significativas mostra qual sua contribuição para o efeito (resposta ou variável dependente).