

CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS

CURSO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS

LUCAS HENRIQUE DE ABREU

DESENVOLVIMENTO DE COMPÓSITO OBTIDO A PARTIR DA RECICLAGEM DE
EMBALAGENS CARTONADAS

BELO HORIZONTE

2017

LUCAS HENRIQUE DE ABREU

DESENVOLVIMENTO DE COMPÓSITO OBTIDO A PARTIR DA RECICLAGEM DE
EMBALAGENS CARTONADAS

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao
Curso de Graduação em Engenharia de Materiais
do Centro Federal de Educação Tecnológica de
Minas Gerais como requisito parcial para obtenção
do título de Bacharel em Engenharia de Materiais.

Orientador: Dr. Marcello Rosa Dumont

BELO HORIZONTE

2017

LUCAS HENRIQUE DE ABREU

**DESENVOLVIMENTO DE COMPÓSITO OBTIDO A PARTIR DA RECICLAGEM
DE EMBALAGENS CARTONADAS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao
Curso de Graduação em Engenharia de Materiais
do Centro Federal de Educação Tecnológica de
Minas Gerais como requisito parcial para obtenção
do título de Bacharel em Engenharia de Materiais.

Aprovado em: 05 de julho de 2017

BANCA EXAMINADORA

Dr. Marcello Rosa Dumont

Profa. Dra. Aline Bruna da Silva

Profa. Roberta Viana Ferreira

RESUMO

As embalagens cartonadas estão presentes no cotidiano da sociedade. Devido a praticidade, facilidade de transporte, leveza e conservação de perecíveis elas se tornam um material ideal para a indústria de embalagens. O problema está no descarte dessas embalagens pois, exceto o papel, os materiais constituintes demoram anos para se decompor quando estão no meio ambiente. Deste modo, o foco deste trabalho está na reciclagem dessas embalagens e nos resíduos de alumínio e polietileno de baixa densidade. Foi criada uma rota de reciclagem na qual as fibras de celulose fossem desagregadas dos demais possibilitando assim a obtenção de um compósito de polietileno e alumínio. A desagregação da celulose foi feita por agitação mecânica, após hidratação. A matéria prima obtida consistiu em dois tipos de materiais: lâminas de alumínio com polietileno e películas contendo apenas polietileno. Foram obtidos compósitos em quatro condições diferentes alternando as lâminas e o formato das lâminas. As amostras foram submetidas ao ensaio de tração para avaliar as propriedades mecânicas: módulo de elasticidade, limite de escoamento, alongamento e limite de resistência a tração. Todas as condições apresentaram resultados superiores ao polietileno puro, com valores de: módulo de elasticidade $1654 \text{ MPa} \pm 176 \text{ MPa}$, limite de escoamento $4,1 \text{ MPa} \pm 0,7 \text{ MPa}$, alongamento $4 \% \pm 1 \%$ e o limite de resistência de $9 \text{ MPa} \pm 1 \text{ MPa}$.

Palavras-chave: Embalagens cartonadas, Tetra Pak®, reciclagem, prensagem, alumínio, polietileno de baixa densidade.

ABSTRACT

Carton packs are present in the routine of society. Due to the practicality, ease to transport, lightness and conservation of perishables they become an ideal material for the packaging industry. The problem is on their discard because, except paper, the constituent materials take years to decompose when they are in the environment. Thus, the focus of this work is on low density aluminum and polyethylene waste. The objective is to create a recycling route that the cellulose fibers were disaggregated from the others materials making possible to obtain a composite of polyethylene and aluminum. Cellulose disintegration was performed by mechanical agitation after hydration. The raw material obtained consisted of two types of materials: aluminum sheet with polyethylene and films containing only polyethylene. Composites were obtained in four different conditions alternating the sheets and the shape of the sheet. The samples were submitted to the tensile test to evaluate the mechanical properties: modulus of elasticity, yield limit, elongation and limit of tensile strength. All four conditions presented higher results than pure polyethylene, with values up to: modulus of elasticity $1654 \text{ MPa} \pm 176 \text{ MPa}$, flow limit $4.1 \text{ MPa} \pm 0.7 \text{ MPa}$, elongation $4 \% \pm 1\%$ and the resistance limit of $9 \text{ MPa} \pm 1 \text{ MPa}$.

Keywords: Carton packaging, Tetra Pak®, recycling, pressing, aluminum, low-density polyethylene.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Embalagem original (tetraedro) e embalagem atual (paralelepípedo) das embalagens cartonadas	13
Figura 2 - Estrutura da embalagem cartonada.	15
Figura 3 - Composição das embalagens cartonadas.	16
Figura 4 - Proporção de material reciclado em atividades industriais de embalagem longa vida no Brasil.	19
Figura 5 - Embalagens cartonadas pós consumo indo para o Hidrapulper e processo de desagregação da celulose, respectivamente.	20
Figura 6 – Fluxograma do ciclo de vida da embalagem Tetra Pak®.	22
Figura 7 - Diferentes tipos de polietileno.	23
Figura 8 – Fluxograma de classificação dos compósitos segundo o agente reforçante.	29
Figura 9 – Embalagens após o corte e secagem.	31
Figura 10 – Embalagens no tanque com água.	32
Figura 11 – Embalagens no tanque com agitação.	33
Figura 12 - Fluxograma da metodologia aplicada no trabalho.	36
Figura 13 – Matéria prima para a produção do compósito: película de polietileno e lâmina de alumínio, respectivamente.	37
Figura 14 – Diferença da superfície de uma amostra preparada inteira (a esquerda) e picotada (a direita).	39
Figura 15 - Variação dos valores de área obtidos para os corpos de prova.	42
Figura 16 – Curva Tensão <i>versus</i> Deformação do corpo de prova número 3 da condição 01.	43
Figura 17 - Curva Tensão <i>versus</i> Deformação do corpo de prova número 1 da condição 02.	45
Figura 18 – Curva Tensão <i>versus</i> Deformação do corpo de prova número 7 da condição 03.	46
Figura 19 - Curva Tensão <i>versus</i> Deformação do corpo de prova número 8 da condição 04.	48
Figura 20 - Diagrama de caixa do Módulo de elasticidade das 04 condições de preparação e do polietileno puro.	50

- Figura 21 - Diagrama de caixa do limite de escoamento das 04 condições de preparação e do polietileno puro. 51**
- Figura 22 - Diagrama de caixa do alongamento das 04 condições de preparação. 53**
- Figura 23 - Diagrama de caixa do limite de resistência das 04 condições de preparação e do polietileno puro. 54**

LISTAS DE TABELAS

Tabela 1 - Tempo de decomposição dos componentes da embalagem cartonada.	18
Tabela 2 - Propriedades físicas e mecânicas do polietileno de baixa densidade (PEBD).	24
Tabela 3 - Propriedades mecânicas do alumínio comercialmente puro.	27
Tabela 4 - Valores de pesagem de uma lâmina de alumínio (com PE) e da película de polietileno.	37
Tabela 5 - Valores de pesagem da matéria prima para confecção das placas de compósito.	38
Tabela 6 - Medições realizadas nos corpos de prova da placa de lâminas inteiras de Al.	40
Tabela 7 - Medições realizadas nos corpos de prova da placa de lâminas inteiras de Al e película de PE.	40
Tabela 8 - Medições realizadas nos corpos de prova da placa de Al picotado.	41
Tabela 9 - Medições realizadas nos corpos de prova da placa da lâmina de Al e película de PE picotados.	41
Tabela 10 - Valores de módulo de elasticidade, limite de escoamento, alongamento e o limite de resistência respectivamente de cada corpo de prova submetido a condição 01.	44
Tabela 11 - Valores de módulo de elasticidade, limite de escoamento, alongamento e o limite de resistência respectivamente de cada corpo de prova submetido a condição 02.	45
Tabela 12 – Valores de módulo de elasticidade, limite de escoamento, alongamento e o limite de resistência respectivamente de cada corpo de prova submetido a condição 03.	47
Tabela 13 - Valores de módulo de elasticidade, limite de escoamento, alongamento e o limite de resistência respectivamente de cada corpo de prova submetido a condição 04.	48
Tabela 14 - Propriedades mecânicas do polietileno e alumínio.	49

SUMÁRIO

RESUMO	3
ABSTRACT	4
LISTA DE FIGURAS	5
LISTAS DE TABELAS	7
SUMÁRIO	8
1 INTRODUÇÃO	10
2 OBJETIVOS	12
2.1 Objetivos gerais	12
2.2 Objetivos específicos	12
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	13
3.1 Embalagens cartonadas	13
3.1.1 Histórico	13
3.1.2 Composição	14
3.1.3 Processamento	16
3.1.4 Aspectos positivos das embalagens cartonadas	17
3.1.5 Aspectos negativos do descarte no Meio Ambiente	17
3.1.6 O processo de reciclagem das embalagens cartonadas	19
3.1.7 A reciclagem do papel	20
3.1.8 A reciclagem da polpa alumínio e polietileno	21
3.2 Polietileno	22
3.2.1 Polietileno de baixa densidade (PEBD)	23
3.2.2 Propriedades do PEBD	24
3.3 Alumínio	25
3.3.1 Histórico	25
3.3.2 Características	25
3.3.3 O alumínio na indústria	27
3.4 Compósitos	28
3.4.1 Definição	28
3.4.2 Ligação interfacial	29
3.4.3 Compósitos reforçados com partículas	29

	9
3.4.4 Compósitos reforçados com fibras	30
4 PARTE EXPERIMENTAL	31
<i>4.1 Material</i>	31
<i>4.2 Método</i>	31
<i>4.2.1 Obtenção da matéria-prima</i>	31
<i>4.2.2 Obtenção das placas do compósito</i>	33
<i>4.2.3 Obtenção dos corpos de prova</i>	35
<i>4.2.4 Ensaio mecânico</i>	35
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES	37
<i>5.1 Resultado da obtenção da matéria prima</i>	37
<i>5.2 Resultados das placas do compósito</i>	37
<i>5.3 Resultados do ensaio de tração</i>	39
<i>5.3.1 Condição 01: Lâminas inteiras de alumínio e polietileno</i>	43
<i>5.3.2 Condição 02: Lâminas inteiras de Al (com PE) + películas inteiras de polietileno</i>	44
<i>5.3.3 Condição 03: Lâminas picotadas de alumínio (com PE)</i>	46
<i>5.3.4 Condição 04: Lâminas picotadas de Al (com PE) + películas picotadas de polietileno</i>	47
<i>5.4 Discussão dos resultados das propriedades mecânicas</i>	48
<i>5.4.1 Módulo de elasticidade (E)</i>	49
<i>5.4.2 Limite de escoamento</i>	50
<i>5.4.3 Alongamento</i>	52
<i>5.4.4 Limite de resistência a tração</i>	53
6 SUGESTÃO DE USO	55
7 CONCLUSÕES	57
8 TRABALHOS FUTUROS	58
9 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	59

1 INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, o consumo de leite e sucos em embalagens cartonadas vem crescendo em todo mundo. Esse fato é associado as vantagens de conservação, transporte e peso desse material quando comparadas com outros tipos de embalagens como plásticos e vidros. Como vivemos em uma sociedade preocupada com otimização de tempo e energia, essas embalagens se mostram ideais pois conseguem conservar o produto em uma faixa grande de temperatura, além de leves e fácil transporte. Tomando proporções mundiais, a cada semana são produzidas e consumidas bilhões de unidades dessas embalagens (FOELKEL, 2015).

Em sua composição, essas embalagens usam materiais que são produzidos em escala industrial e juntos melhoram as propriedades do produto final. São eles: o alumínio, o polietileno de baixa densidade e as fibras de celulose do papel duplex sendo que cada um tem sua função. Após um processo de união desses materiais eles são envazados e destinados ao consumo da população.

A grande problemática, no entanto, é o descarte dessas embalagens no meio ambiente, já que apenas 28 % delas são recicladas. Na maioria das vezes, elas são destinadas a aterros sanitários ou lixões, e sofrem um lento processo de decomposição. Mesmo que o papel tenha menor tempo para decomposição a sua posição entre lâminas de polímero e alumínio impedem com que isso ocorra no tempo adequado. Existem processos de reutilização tanto para o papel quanto para o resíduo formado pelo alumínio e o polietileno, sem que esses percam suas propriedades. Ou seja, ainda que seja possível reciclar 100 % dos materiais das embalagens cartonadas, não é uma prática rotineira na indústria devido à dificuldade em separa-los (FOELKEL, 2015).

Além disso, as embalagens são usadas em contato com alimentos sendo necessária a correta higienização na reciclagem. Assim, o custo para reciclar os materiais pode inviabilizar a sua aplicação industrial. No entanto, essa é uma questão que não pode ser deixada de lado, visto que ainda crescente, as embalagens cartonadas representam entre 2 % e 4 % em peso do lixo produzido no Brasil (FOELKEL, 2015). Como investir em máquinas que garantem a pureza desses materiais separados pode ser um trabalho oneroso e caro, tornam-se importante estudos que considerem a obtenção dos materiais na forma de compósitos.

O foco do trabalho é uma rota de processamento do resíduo formado pelo alumínio e polietileno, já que quando despejados no meio ambiente eles trazem impactos negativos. A ideia de empregar tecnologia para produzir um material novo pode aumentar o seu preço devido maior qualidade, além da valorização da mão de obra. Esse processo torna-se vantajoso tanto para o produtor, que obtêm a matéria prima proveniente do descarte, quanto para o cliente, que tem um produto de qualidade e propriedades adequadas.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivos gerais

O objetivo geral deste trabalho é produzir e caracterizar compósitos de matriz polimérica, composta de polietileno de baixa densidade, reforçado com partículas metálicas de alumínio, obtidos a partir de métodos de reciclagem de embalagens cartonadas.

2.2 Objetivos específicos

Os objetivos específicos desse trabalho são:

- a) Pesquisar a respeito de compósitos oriundos de embalagens cartonadas, discutindo as técnicas já utilizadas para obtenção dos mesmos.
- b) Propor uma rota para produzir compósitos a partir de embalagens cartonadas.
- c) Caracterizar as propriedades mecânicas por meio de ensaio de tração nos compósitos obtidos correlacionando variações nos métodos de obtenção com o desempenho.
- d) Identificar a potencialidade destes compósitos obtidos, para utilização industrial e comercial.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Embalagens cartonadas

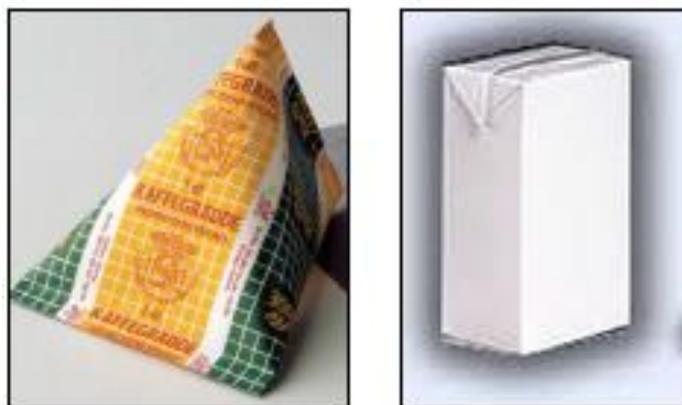
3.1.1 Histórico

As primeiras embalagens cartonadas surgiram na Suécia em plena Segunda Guerra Mundial, no ano de 1947, inventadas por Ruben Rausing. Tinham o formato tetraédrico e era composta por papel e plástico e o selamento era feito a vácuo. A ideia da criação era conservar os alimentos de maneira tão ou mais eficaz quantas embalagens convencionais e aliar essa inovação ao baixo custo para obter resultados competitivos no mercado (SOUZA, 2011).

Assim, essas embalagens chamadas de cartonadas, assépticas ou multicamadas, conseguem combinar características de diferentes materiais e ter como resultado final um produto que consegue comportar diferentes tipos de alimentos. Além disso, com a conservação é possível estender o prazo de validade desses. É por isso que essas embalagens conseguem armazenar líquidos de diferentes viscosidades tais como leites, sucos, molhos, dentre outros (SOUZA, 2011).

Na década de 50 houve uma inovação no formato dessas embalagens e elas passaram de tetraédrica para paralelepípedo. Com isso, maior tecnologia foi empregada na sua produção e o envasamento asséptico foi aprimorado. A diferença entre uma embalagem cartonada no formato antigo e o modelo semelhante ao atual é mostrada na Figura 1 (SOUZA, 2011).

Figura 1 - Embalagem original (tetraedro) e embalagem atual (paralelepípedo) das embalagens cartonadas



Fonte: Souza (2011).

No Brasil, elas foram inseridas no mercado em 1957 e atualmente há duas indústrias que as produzem: Tetra Pak® e SIG Combibloc®. A fabricação é feita em duas cidades: Ponta Grossa (Paraná) e Monte-Mor (São Paulo). Juntas, essas cidades produzem aproximadamente 5 % da produção mundial de embalagens cartonadas chegando ao número de sete bilhões de embalagens produzida (SOUZA, 2011).

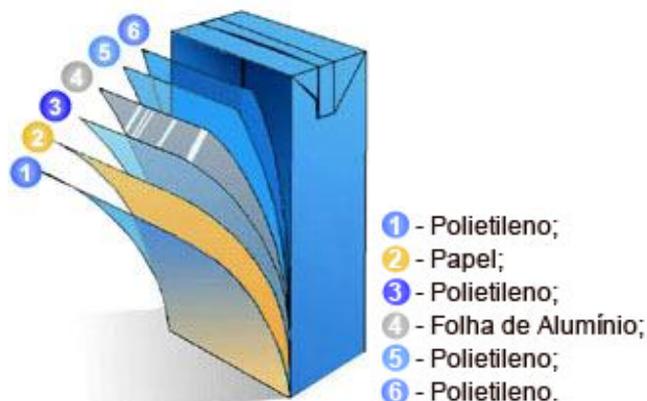
3.1.2 Composição

A estrutura de uma embalagem cartonada consiste em três tipos de materiais, dispostos em finas lâminas, posicionados de acordo com uma sequência que exerce influência sobre o produto final. Os materiais são papel cartão duplex, polietileno de baixa densidade e alumínio. Juntos, eles somam seis camadas para formar a embalagem cartonada (ALVARENGA, 2013). Segundo Neves (2009), a seleção dos materiais de cada camada pode ser descrita da seguinte forma:

- a) Camada 01: O polietileno tem como função dar um aspecto de brilho e proteger a impressão do papel.
- b) Camada 2: Papel cartão que dá resistência mecânica a embalagem, pois assim é possível transportar o produto sem comprometimento do líquido em seu interior. Além disso, ele protege contra choques mecânicos ou quedas e apresenta as informações nutricionais do produto na sua impressão.
- c) Camada 3: O polietileno proporciona melhorias na ligação entre o papel e o alumínio.
- d) Camada 4: O alumínio tem como função impedir a entrada de luz e ar para o alimento presente no interior da embalagem. Com isso, essa camada tem importante papel na proteção de oxidação e fotoxidação.
- e) Camadas 5 e 6: Novamente a presença do polietileno, mas dessa vez sua função é impedir o contato do alumínio com o alimento, pois, o PEBD é um polímero de baixa toxicidade.

A composição de uma embalagem cartonada e descrição das seis camadas estão presentes na Figura 2.

Figura 2 - Estrutura da embalagem cartonada.



Fonte: Alvarenga (2013).

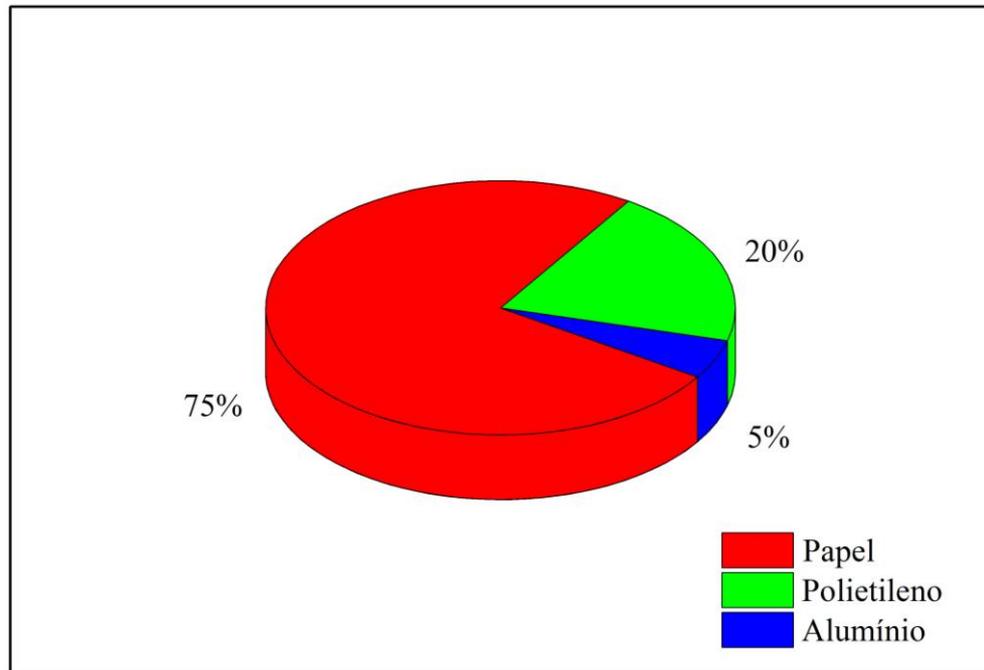
Uma das vantagens das embalagens cartonadas é a sua leveza. Para isso, é preciso analisar e controlar o peso dos materiais presentes. Como apresentado, cerca de 75 % do peso da embalagem é devido o papel cartão da espécie duplex. As fibras de celuloses são obtidas através do eucalipto ou pinus, que são árvores de reflorestamento. Em seguida, há união de duas a quatro camadas de papel para dar estrutura e garantir a resistência da embalagem. Existem alguns parâmetros que se destacam com maior relevância no momento de análise e controle para obter o papel ideal, tais como: propriedades ópticas, mecânicas, gráficas, de umidade, entre outros (BORGES, 2007; SOUZA, 2011).

Embora presente em quatro das seis camadas, o polietileno de baixa densidade (PEBD) corresponde a 20 % do peso. Esse material funciona como uma resina ligante entre as camadas e também tem função protetora. No caso dos polímeros, os fatores a ser analisados para o material cumprir adequadamente seu papel são: índice de fluidez, que relaciona a massa molar com a viscosidade, densidade e distribuição do peso molar (BORGES, 2007).

As lâminas de alumínio têm espessuras acima de 18 μm e tem a função de evitar contato com agentes indesejáveis para o material do interior das caixas. Esse material equivale a 5 % do peso total da embalagem devido a presença de só uma camada e sua baixa densidade. Há boa resistência a solventes e a gordura, mas para água e alguns ácidos é fraca. Ainda que o alumínio apresente resistência a tração não muito elevada, para baixas temperaturas essa resistência melhora consideravelmente, o que viabiliza o comércio das embalagens em ambientes frigoríficos (BORGES, 2007). Esse alumínio presente nas embalagens consegue refletir mais de 95 % do calor proveniente das radiações, ou seja, de acordo com o polimento da superfície do material ele consegue emitir menos de 5 % (JALES, 2013).

As informações sobre as porcentagens de distribuição de peso de cada material na composição da embalagem cartonada são exibidas na Figura 3 (SOUZA, 2005).

Figura 3 - Composição das embalagens cartonadas.



Fonte: Adaptado de Souza (2005).

Segundo Jales (2013) embalagens cartonadas aplicadas na indústria civil no segmento de isolamentos e cobertura para forros geram redução na temperatura interna em aproximadamente 25 %.

3.1.3 Processamento

O processamento das embalagens multicamadas é a laminação por extrusão. O procedimento inicia-se com a produção das lâminas de celulose. Em seguida, há a impressão no papel cartão formando de um rolo que segue para a próxima etapa de modo contínuo. Posteriormente, o polietileno é alimentado na forma de *pellets* em uma extrusora. Nela ele é amolecido e na saída é aplicado entre as camadas de alumínio e papel, funcionando como um adesivo. Essa aplicação é feita por uma fenda do cabeçote. Após a adição de todos os componentes há a formação de um rolo chamado de “jumbo” que irá para o corte e depois direcionar cada faixa impressa para uma bobina diferente para ser embalada, paletizada e por fim comercializada para as indústrias alimentícias (ALVARENGA, 2013; NEVES, 2009).

Nessas indústrias, os produtos são envasados. Essa etapa é importante para garantir a qualidade final do produto e acontece numa máquina específica para isso. Nesse momento ela recebe há a alimentação com a bobina com as embalagens e em seguida é esterilizada e o alimento a ser conservado é vertido na embalagem. A etapa final é o lacre e então o produto segue para ser vendido (ALVARENGA,2013; NEVES, 2009).

3.1.4 Aspectos positivos das embalagens cartonadas

Uma das principais vantagens dessas embalagens está associada a sua função de preservar alimentos consequentemente aumentando o tempo de uso. Isso é porque a disposição das lâminas dos diferentes materiais consegue barrar oxigênio, luz, microorganismos entre outros, conferindo maior proteção ao conteúdo das caixas. Essa conservação é feita sem adição de conservantes, sendo admissível poupar o material e ainda obtê-lo fresco. Ainda com a maior duração do produto é possível manter o seu preço estável ao longo do tempo (SOUZA, 2011).

Após a embalagem do produto é possível percorrer longas distâncias sem a necessidade de refrigeração, logo, permitindo as embalagens chegarem ao destino final intactas e já pronta para serem consumidas. Dessa maneira, há economia de energia das câmaras frias, geladeiras e caminhões frigoríficos (CERQUEIRA, 2006; ALVARENGA, 2013)

Quando comparada com vidro, por exemplo, as embalagens cartonadas têm dois aspectos positivos que se destacam. Um deles está associado ao cuidado necessário no transporte. Outra vantagem é advinda da sua composição, pois é grande a diferença de espaço ocupado e peso. Uma embalagem multicamadas tem o peso de aproximadamente 28 gramas (SOUZA, 2011) e pela sua resistência mecânica elas podem ser empilhadas, o que traz economia se espaço, seja no transporte ou para o armazenamento no estoque.

3.1.5 Aspectos negativos do descarte no Meio Ambiente

A tendência da sociedade atual é de usar embalagens recicláveis e de fácil descarte. Com isso, na teoria, o problema da quantidade de resíduos descartados de modo inadequado no meio ambiente diminuiria caso houvessem práticas de reciclagem eficazes. No entanto nem todos países apresentam essa consciência sustentável. No caso das embalagens cartonadas mesmo com alto potencial de reciclagem dos materiais constituintes, esse processo ainda pode ser um

empecilho pois há certa dificuldade de encaminhar compósitos para a reciclagem. Algumas cooperativas e coletores de resíduos sólidos muitas vezes tem preferência por deixar esses materiais no meio ambiente do que realizar a reciclagem ou destinação adequada (SOUZA, 2011). Os cuidados com os resíduos orgânicos também são fundamentais para uma reciclagem adequada pois pode haver proliferação de bactérias e mau cheiro (CEMPRE, 2017)

Como abordado anteriormente, os três materiais constituintes da embalagem cartonada são: papel, alumínio e plástico. Como esses materiais apresentam aspectos físicos e químicos bem diferentes à reciclagem pode se tornar mais onerosa que outras. A Tabela 1 contém informações sobre o tempo de decomposição desses materiais quando deixados no meio ambiente (SOUZA, 2011).

Tabela 1 - Tempo de decomposição dos componentes da embalagem cartonada.

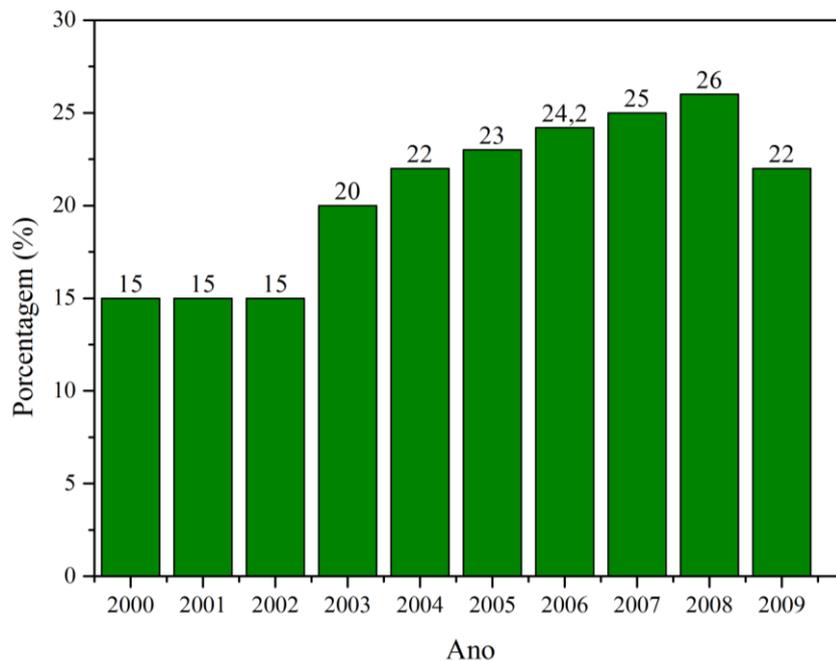
ELEMENTO	TEMPO
Papel	De 2 meses a 5 meses
Alumínio	De 100 anos a 500 anos
Plástico (em geral)	De 100 anos a 300 anos

Fonte: Souza (2011).

A partir dos dados é importante ter a consciência de que, com exceção do papel, os materiais descritos demoram um tempo muito longo para se decompor, sem contar com liberação de possíveis toxinas durante esse processo. Ainda que o papel tenha um curto tempo de decomposição ele precisa ser reciclado para evitar o desmatamento (SOUZA, 2011). Segundo D'Alessio (2009) dados estatísticos mostram que para cada tonelada de embalagem cartonada que é encaminhada para reciclagem produz-se cerca de 700 quilos de papel, evitando-se o corte de 21 árvores em idade adulta.

Além do fator ambiental, outro aspecto negativo para o descarte dessas embalagens no meio ambiente é a questão energética. Para produzir a matéria prima para as embalagens cartonadas ou outros materiais, há um gasto de energia. Os materiais que possuem capacidade de reciclagem necessitam de menor gasto energético para o reprocessamento, o que pode gerar economia financeira para a empresa (SOUZA, 2011). Desde os anos 2000 a porcentagem de embalagens recicladas vem aumentando. Por exemplo, de 2000 a 2009 a reciclagem das embalagens aumentou de 15 % para 22 % no Brasil, mostrado na Figura 4.

Figura 4 - Proporção de material reciclado em atividades industriais de embalagem longa vida no Brasil.



Fonte: Souza (2011).

Dados mais recentes apontam que em 2015 a taxa de embalagens longa vida recicladas foi aproximadamente 21 %, chegando em peso em mais de 59 toneladas. Ainda que observa-se um aumento na reciclagem das embalagens nos últimos anos, esses dados mostram que se deve investir mais na conscientização da população visando aumentar a porcentagem de embalagens cartonadas recicladas. A reciclagem se torna a melhor alternativa para o destino das embalagens já utilizadas (CEMPRE, 2017).

3.1.6 O processo de reciclagem das embalagens cartonadas

A reciclagem das embalagens cartonadas permite um novo destino para as três matérias-primas existentes no processo. Para o papel, é possível processá-lo para ser utilizado como papel novamente. O polietileno de baixa densidade pode ser reprocessado através de outra injeção ou extrusão. E o alumínio pode ser obtido na forma de lingotes que serão matéria prima de diversos setores, como por exemplo, a fundição (SOUZA, 2011).

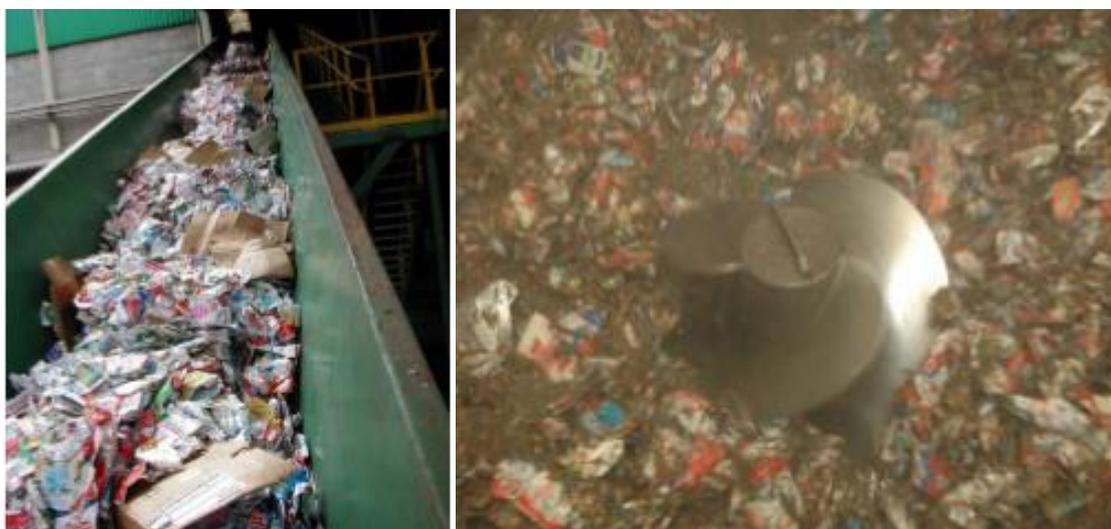
O processo de reciclagem desse material basicamente é realizado em duas etapas: a desagregação da polpa celulósica e a reciclagem do composto formado pelo polímero e o alumínio (BORGES, 2007)

3.1.7 A reciclagem do papel

A separação do papel é predominantemente feita por uma máquina chamada Hidrapulper. Nela, toda a embalagem é misturada com água em um rotor que provocará interação da água com o papel e agitação. Há Hidrapulpers de alta consistência (10 % a 15 %) atuando nas fibras mais brandas e o de baixa consistência (abaixo de 6 %) provocando um processo mais acentuado para desagregação das fibras. Para não interferir na qualidade final das fibras de celulose, recomenda-se agitação entre 25 minutos a 35 minutos. Em seguida, já hidratadas e desagregadas, as fibras ficam suspensas na mistura e são separadas da mistura de polietileno e alumínio através de um bombeamento na parte inferior do hidrapulper e passando por uma placa perfurada que exerce função de peneira para se obter somente o papel (BORGES, 2007).

As embalagens a caminho da Hidrapulper e a desagregação da celulose no rotor são apresentadas, respectivamente na Figura 5 (BORGES, 2007).

Figura 5 - Embalagens cartonadas pós consumo indo para o Hidrapulper e processo de desagregação da celulose, respectivamente.



Fonte: Borges (2007).

Em seguida, há mais uma etapa para retirada de impurezas da celulose. Finalmente ela é seca e pode ser direcionada para os setores ou empresas que confeccionam produtos como papel cartão, embalagens de papel, papel higiênico, papelão, entre outros (BORGES, 2007).

3.1.8 A reciclagem da polpa alumínio e polietileno

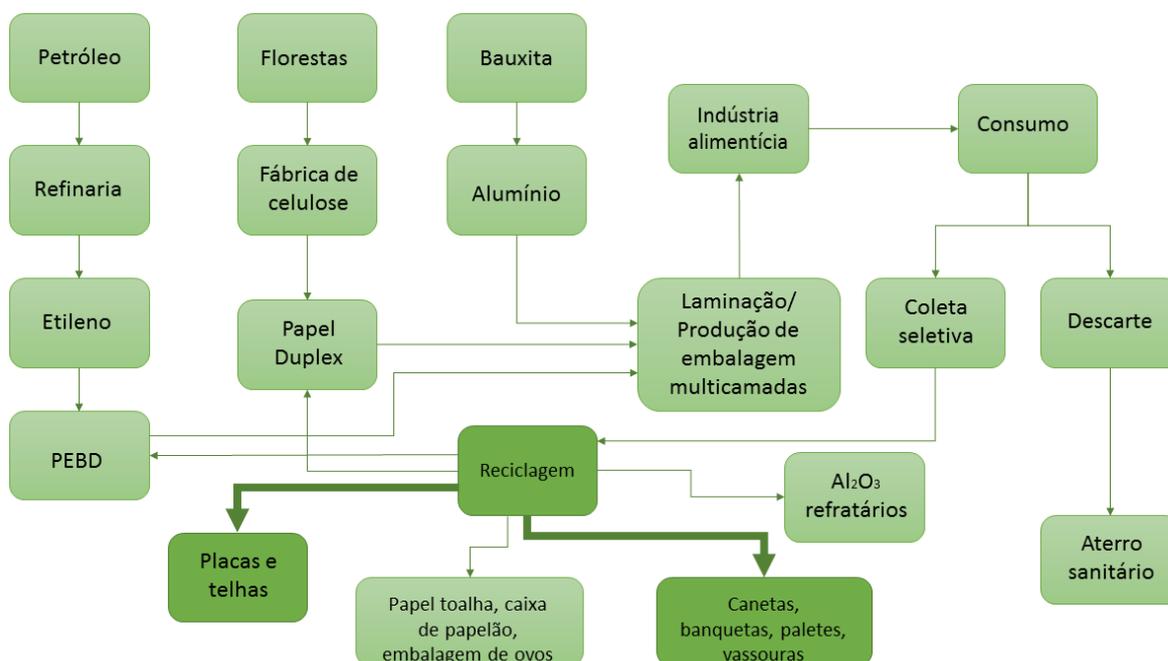
A mistura entre polietileno de baixa densidade e alumínio segue no processo para serem reciclados. Nessa reciclagem pode haver a separação dos dois materiais ou não, dependendo do produto final (BORGES, 2007). A pirólise, por exemplo, é um processo que há separação dos materiais para gerar reaproveitamento do alumínio. Ela consiste no aquecimento para causar a degradação térmica do polímero, que é decomposto em hidrocarbonetos na forma de gases que podem ser condensados para formarem a parafina. Já o alumínio é fundido, e passa pelo lingotamento, formando lingotes que podem ser reutilizados (ALVARENGA, 2013).

Há duas maneiras de reciclar esses materiais sem separá-los: pela aglutinação, extrusão e moldagem por injeção ou pela prensagem a quente (CERQUEIRA, 2006). No método da aglutinação o polímero é agitado a seco por um rotor e chega a uma temperatura de plastificação, na qual ele está mais maleável e menos viscoso. Então água é adicionada para dar um choque térmico na mistura e aumentar a sua densidade, facilitando passagem pela extrusora. Posteriormente a umidade é eliminada através de um exaustor posicionado na saída dos gases do aglutinador. Assim, no final dessa etapa há um material mais homogêneo e com melhor dispersão do alumínio, além de minimizada a ocorrência de bolhas no futuro. A etapa posterior é a extrusão do para formação de pellets. Esses serão a matéria-prima a injeção ou laminação e formação de peça como canetas, cabides, cestos de lixo, telhas, entre outros (BORGES, 2007).

Já o outro processo, é característico para a produção de telhas e placas. A matéria prima é triturada em menores fragmentos de modo a facilitar a homogeneização. Em seguida o material é prensado na temperatura de aproximadamente 180 °C e conformado em telhas através de moldes ondulados (CERQUEIRA, 2006).

Para partí o processo de obtenção da matéria prima, processamento, uso e descarte dos materiais quem compõe as embalagens cartonadas, o fluxograma sobre o ciclo de vida completo desses materiais é apresentado na Figura 6.

Figura 6 – Fluxograma do ciclo de vida da embalagem Tetra Pak®.



Fonte: Adaptado de Jales (2013).

3.2 Polietileno

O polietileno (PE) é um polímero flexível e semicristalino, sendo a quantidade de fases amorfas e cristalinas responsáveis por determinar suas propriedades e características. Além disso, devido ao seu alto peso molecular e natureza parafínica, esse polímero é inerte aos produtos químicos comuns. Ele se apresenta parcialmente solúvel a grande parte dos solventes quando é empregado em temperaturas inferiores a 60 °C. Devido a essas características e à sua baixa toxicidade, é comum o contato desse polímero com produtos alimentícios e farmacêuticos (CERQUEIRA, 2006; COUTINHO, 2013).

Assim como a maioria dos termoplásticos, o polietileno é um polímero que apresenta o petróleo como matéria-prima (BORGES, 2007). A sua reação de obtenção é a de poliadicação. Ela é caracterizada por apresentar monômeros com ligações duplas entre os átomos de carbono e não são gerados subprodutos. Assim, o polímero pode atingir alto peso molecular, na ordem de 10⁵ g/mol a 10⁶ g/mol (MANO, 1991).

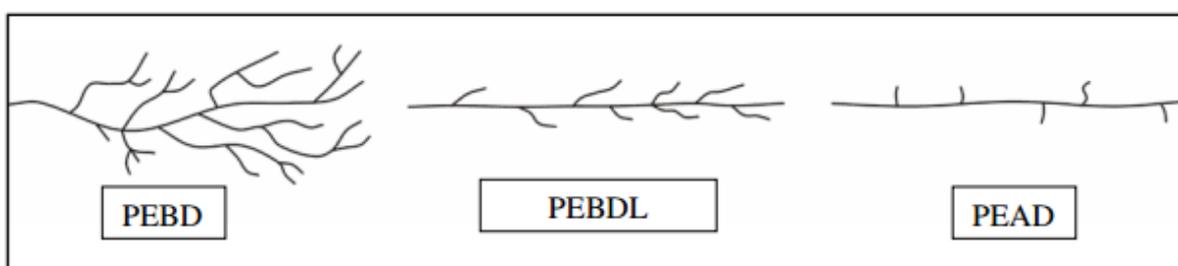
Há diversas classificações dos tipos de polímeros que variam de acordo com o critério utilizado. A partir da sua aplicação, os polímeros são classificados como de uso geral ou de engenharia. Já com relação ao uso e propriedades mecânicas podem ser termoplásticos ou

termorrígidos (MANO, 1991). O polietileno é um termoplástico de aplicação geral e de acordo com as condições e do sistema catalítico da reação de polimerização podem ser obtidos cinco diferentes tipos (COUTINHO, 2013).

- a) Polietileno de baixa densidade (PEBD ou LDPE);
- b) Polietileno de alta densidade (PEAD ou HDPE);
- c) Polietileno linear de baixa densidade (PELBD ou LLDPE);
- d) Polietileno de ultra alto peso molecular (PEUAPM ou UHMWPE);
- e) Polietileno de ultra baixa densidade (PEUBD ou ULDPE)

Segundo Mesquita (2010), a densidade é o fator principal para classificação dos tipos de polietileno, que são mostrados na Figura 7.

Figura 7 - Diferentes tipos de polietileno.



Fonte: Mesquita (2010).

No caso das embalagens multicamadas, o tipo de polietileno usado é o polietileno de baixa densidade (BORGES, 2007).

3.2.1 Polietileno de baixa densidade (PEBD)

O polietileno de baixa densidade é um polímero obtido nas seguintes faixas de temperatura e pressão, respectivamente, 1000 atm a 3000 atm e 200 °C a 275 °C. Recomenda-se não atingir temperaturas acima de 300 °C para não degradar o polímero (CERQUEIRA, 2006). Como sua reação de formação é extremamente exotérmica e realizada sob alta pressão, há grande liberação de calor e formação de ramificações na cadeia, impedindo a obtenção de um polietileno linear. Essas ramificações formadas podem ser longas, atingindo extensão tão grande quanto a cadeia principal, ou curtas (COUTINHO, 2013).

3.2.2 Propriedades do PEBD

Com isso, a viscosidade e o grau de cristalinidade do polímero são afetados, de modo que o PEBD, ao ser comparado ao polietileno linear, apresenta maior desordem cristalina, menores cristalitas e conseqüentemente menor fração cristalina (CERQUEIRA, 2006). Segundo Cerqueira (2006), Gomes (2014), Mano (1991) e Rocha (2014), as principais características físicas e mecânicas desse polímero são encontradas na Tabela 2.

Tabela 2 - Propriedades físicas e mecânicas do polietileno de baixa densidade (PEBD).

PROPRIEDADES	PEBD
Peso molecular	50.000 g/mol
Temperatura de transição vítrea (Tg)	-20 °C a -30 °C
Cristalinidade	50 % a 60 %
Densidade	0,912 g/cm ³ a 0,925 g/cm ³
Temperatura de fusão cristalina (Tm)	102 °C a 112 °C
Índice de refração	1,51 n _o a 1,52 n _o
Limite de escoamento	1,37 MPa
Alongamento no Escoamento	100 % a 800 %
Resistência à Tração	1,37 MPa 7,8 MPa
Módulo Elástico	102 MPa a 240 MPa 52, 15 MPa
Dureza	40 Shore D a 50 Shore D

Fonte: Cerqueira (2006), Gomes (2014), Mano (1991), Rocha (2014).

As aplicações do PEBD são diversas como: brinquedos, utensílios domésticos, filmes laminados, sacolas plásticas, indústria química e farmacêutica, revestimentos de fios e cabos e também no setor de embalagens (MANO, 1991). Certas características específicas o tornam desejável na indústria de embalagens (CERQUEIRA, 2006). Segundo Albuquerque (2001) algumas das principais características deste plástico são:

- a) Simplicidade da cadeia permitindo seu uso em processos de extrusão, moldagem por sopro e por injeção;
- b) Baixo coeficiente de atrito;
- c) Alta tenacidade;

- d) Alta resistência a água que forma a camada impermeável necessária para conservar as embalagens cartonadas;
- e) Alta flexibilidade, facilitando o processamento;
- f) Fácil obtenção quando comparado a outros polímeros, diminuindo os custos do processo.

3.3 Alumínio

3.3.1 Histórico

Mesmo sendo o terceiro elemento mais abundante da crosta terrestre, na natureza ele não é encontrado diretamente em estado metálico, o que faz com que esse metal precise passar por um processo industrial (ALBUQUERQUE, 2013).

O pioneiro para realização do processo que tem como produto final o alumínio isolado foi o físico dinamarquês Hans Christian, em 1825. Mas apenas em 1855 foi divulgado o primeiro processo para obtenção através de escala industrial. Esse processo foi feito pelo norte-americano Charles Martin Hall e pelo Francês Paul Louis Toussaint Héroult, recebendo o nome de Hall-Héroult. Atualmente, o mineral que dá início a obtenção de alumínio isolado é a bauxita e depois ele segue para etapas como refinaria e produção (ALVARENGA, 2013).

No Brasil, as primeiras fábricas que produzem alumínio primário foram construídas no ano de 1950. Mas antes disso o país já possuía indústrias que utilizavam o metal. Uma delas foi criada em 1917, a Companhia Paulista de Artefatos de Alumínio. Ela dependia das importações do produto primário e mesmo assim nesse ano de inauguração conseguiu uma produção anual de um milhão de toneladas (ABAL, 2017).

3.3.2 Características

O alumínio é um material muito versátil com grande capacidade de utilização em diversos setores da indústria. Isso é justificado devido a combinação de algumas características que o tornam ideal. Segundo Cerqueira (2006) elas são: baixo peso específico, excelente condutividade térmica e elétrica, boa ductilidade, permitindo com que ele tenha facilidade para processamento. Também é citada a resistência a corrosão devido a camada de óxido formada

quando o alumínio é exposto a atmosfera. Dessa maneira ele impede que a sua superfície sofra oxidações futuras, protegendo-a. Outra propriedade importante é a de barreira. Devido a impermeabilidade e opacidade desse metal, ele impede que produtos mantidos no seu interior sejam degradados ou contaminado, porque ele bloqueia a passagem de oxigênio, umidade e luz (ABAL, 2017).

Uma das particularidades do alumínio, quando comparado com outros metais, é a sua baixa densidade. Com a massa específica de $2,7 \text{ g/cm}^3$, uma peça de alumínio chega a ser 30 % mais leve que uma de cobre e até 35 % que uma de aço (ABAL, 2017). Além disso, ele possui alta ductilidade tornando mais fácil a sua manipulação. É um metal que pode ser fundido por praticamente todos métodos conhecidos, apresenta ponto de fusão de $660 \text{ }^\circ\text{C}$, e é laminado com grande variedade de espessuras (folhas finas à chapas espessas) (CERQUEIRA, 2006). A sua condutibilidade térmica chega a ser aproximadamente 4,5 vezes maior que a do aço e a refletividade é acima de 80 %, destacando o potencial desse metal para o uso em luminárias e em isolamentos. Outra característica importante é o fato de ser um metal não magnético podendo utiliza-lo como proteção em equipamentos eletrônicos (ABAL, 2017).

Há três tipos de alumínio primário, sendo que a diferença entre eles está no grau de pureza. Eles são:

- a) Alumínio comercialmente puro – originário da redução da alumina (Al_2O_3) em células eletrolíticas, esse tipo raramente excede 99,9 % de pureza. É o mais encontrado no mercado.
- b) Alumínio refinado – o teor de pureza desse alumínio normalmente é superior a 99,9 %. É obtido por eletro refinação do alumínio comercial.
- c) Alumínio refinado por zona – é o tipo com menor quantidade de impurezas, obtendo teores em ppm (parte por milhão) (CERQUEIRA, 2006).

Algumas de suas propriedades mecânicas, as principais características desse metal, são apresentadas na Tabela 3.

Tabela 3 - Propriedades mecânicas do alumínio comercialmente puro.

PROPRIEDADES	Alumínio puro
Limite de resistência a tração	48 MPa
Limite de escoamento	12,7 MPa
Alongamento	Depende da espessura
Módulo de elasticidade (Young)	70 GPa

Fonte: ABAL (2017).

Como a resistência a tração do alumínio comercialmente puro é relativamente baixa quando comparado com outros metais (ALVARENGA, 2013), esse material pode ter seu uso limitado. Para se obter aumento na resistência a tração ou outras propriedades mecânicas, é possível adicionar pequenas quantidades de outros materiais, como manganês e zinco, ou realizar tratamentos térmicos (CERQUEIRA, 2006). Outra maneira de aprimorar essa propriedade é a realização de um trabalho a frio (ALVARENGA, 2013).

3.3.3 O alumínio na indústria

Diante das características já apresentadas, o alumínio se torna uma ótima alternativa para o uso nas embalagens cartonadas. A sua produção ocorre com o processo de laminação. Nesse método de conformação a matéria prima é transformada em chapas planas ou bobinadas, discos e folhas. De maneira geral, no mercado das embalagens, a forma mais comum do alumínio é em folhas. Essas folhas possuem espessuras distintas que serão de acordo com o uso das embalagens: rígidas, flexíveis, descartáveis, cartonadas, entre outras (CERQUEIRA, 2006)

Segundo Alvarenga (2013) outro fator que destaca e viabiliza o uso do alumínio nas diferentes indústrias do ramo da engenharia é a alta capacidade de ser reciclado. Ainda que reciclado esse material não tem perda nas propriedades físico-químicas. Isso confirma a boa aplicação dele para o mercado de embalagens porque é um material eficiente e com longa vida útil e ainda pode ser inteiramente reaproveitando, gerando economia de energia e consequentemente retorno financeiro. Portanto, a utilização desse metal traz benefícios já que através da reciclagem há redução dos resíduos gerados, menor impacto ambiental e também economia de matéria-prima.

3.4 Compósitos

3.4.1 Definição

Segundo a definição, os materiais compósitos são aqueles que possuem mais de uma fase, contendo quantidades significativas dos constituintes, de modo que a combinação apresente características melhores do que quando os materiais são usados individualmente. Para formação de um compósito, então, é preciso juntar materiais diferentes, seja polímero com cerâmico, polímero com metal, metal com cerâmico ou até mesmo polímero com polímero (BORGES, 2007).

Normalmente os compósitos são feitos por duas fases, nas quais uma é a chamada matriz e a outra é o agente reforçante. Essas duas fases são diferenciadas microscopicamente por uma interface distinta. A matriz é aquela encontrada na forma contínua. Ela tem a função estrutural e será a responsável por receber os agentes de reforço, que irão melhorar as propriedades da matriz. A geometria do reforço é fundamental para relacionar as propriedades finais do compósito e suas características. Os dois principais tipos são particulados e fibrosos (CERQUEIRA, 2006)

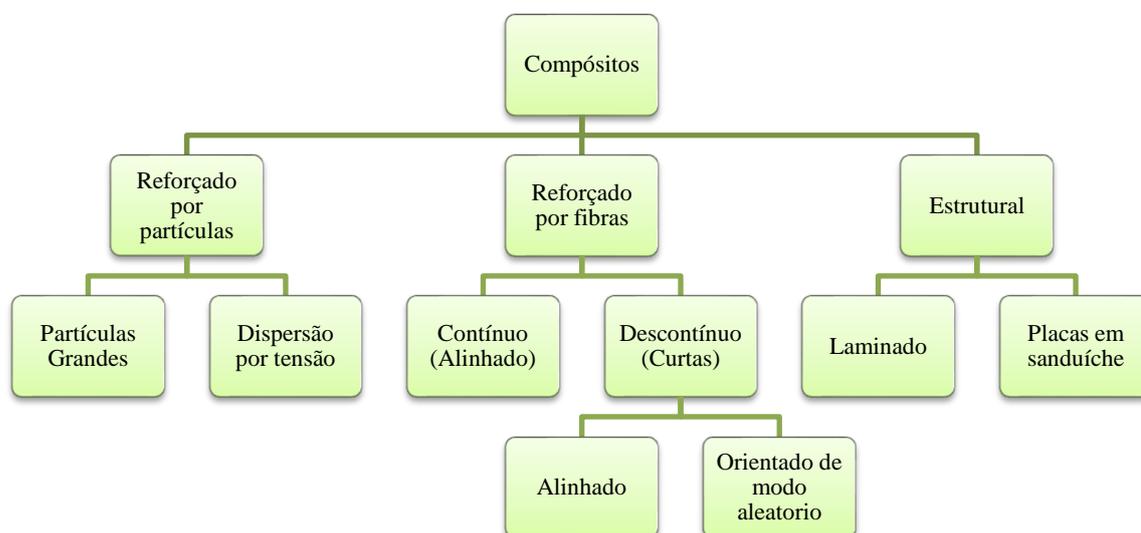
Os reforços particulados são aqueles com dimensões aproximadamente iguais independente da direção medida, podendo ter forma esférica, cúbica dentre outras. De acordo com a sua disposição na matriz podem ser consideradas partículas grandes ou reforçadas por dispersão (CERQUEIRA, 2006).

Os reforços de fibras, por definição, apresentam o comprimento muito maior que o diâmetro. Eles são subdivididos contínuos ou descontínuos. Além disso, podem ser classificados de acordo com a orientação das fibras, sendo unidirecionais, quando estão dispostos preferencialmente em uma direção, ou bidirecionais, quando estão dispostos de maneira aleatória (CERQUEIRA, 2006).

Outra categoria para os compósitos são os estruturais. Nele são apresentados laminados e multicamadas. Eles são fabricados pela sobreposição da matriz e uma sequência já definida do agente reforço. Há também a classificação como híbridos, que são os compósitos que juntam diferentes tipos de fibras no material produzido (CERQUEIRA, 2006).

O fluxograma da classificação dos compósitos segundo o tipo de agente reforçante é mostrado na Figura 8.

Figura 8 – Fluxograma de classificação dos compósitos segundo o agente reforçante.



Fonte: Adaptado de Callister (2008).

3.4.2 *Ligação interfacial*

Quando o compósito é submetido a um esforço mecânico, a carga sofrida pela matriz é transferida para o agente reforçante através da interface. Por isso, é importante garantir a boa adsorção e uma forte ligação entre essas fases porque uma fraca interface pode levar o material a fratura ou a exibir propriedades inferiores a desejada. Isso ocorre porque a interface de um material é uma região descontínua da matéria para análise de propriedades físicas, químicas, mecânicas, entre outras (CERQUEIRA, 2006).

3.4.3 *Compósitos reforçados com partículas*

De acordo com a classificação já exibida, os compósitos reforçados com partículas apresentam duas subdivisões: partículas grandes e reforçados por dispersão. O mecanismo do reforço e o ganho ou não da resistência mecânica são os principais fatores para diferenciar esses grupos. As partículas classificadas como grandes, possuem interações entre reforço-matriz que não podem ser tratadas a nível atômico ou molecular. Nesses casos, a matriz transfere uma fração da tensão aplicada para essas partículas, que possuem maior dureza e rigidez que a mesma (BORGES, 2007).

Para os compósitos que são reforçados por dispersão, há um aumento de resistência ocasionado por partículas de diâmetros entre $0,01 \mu\text{m}$ e $0,1 \mu\text{m}$, o que é considerado um nível atômico ou molecular. Nesse caso, há uma combinação de benefícios, pois enquanto a matriz é responsável por suportar a maior parte dos impactos mecânicos, as partículas de reforço vão dificultar o movimento de discordâncias. Assim, há aumento das propriedades como dureza, limite de escoamento e limite de resistência a tração (BORGES, 2007).

3.4.4 Compósitos reforçados com fibras

É o tipo de compósito com maior destaque no mercado tecnológico, devido à alta razão resistência / peso que esses materiais podem proporcionar. Assim, de maneira geral, as fibras são usadas como reforço, pois garantem elevada rigidez e ao mesmo tempo baixo peso. Esses compósitos são classificados em curtos e alinhados segundo o tamanho das fibras (BORGES, 2007)

A avaliação das características desse tipo de compósito depende não só das propriedades das fibras, mas também de fatores como arranjo, orientação, concentração e distribuição. Através da distribuição uniforme da fibra é possível obter melhores resultados de resistência mecânica e dureza (CALLISTER, 2008).

4 PARTE EXPERIMENTAL

4.1 Material

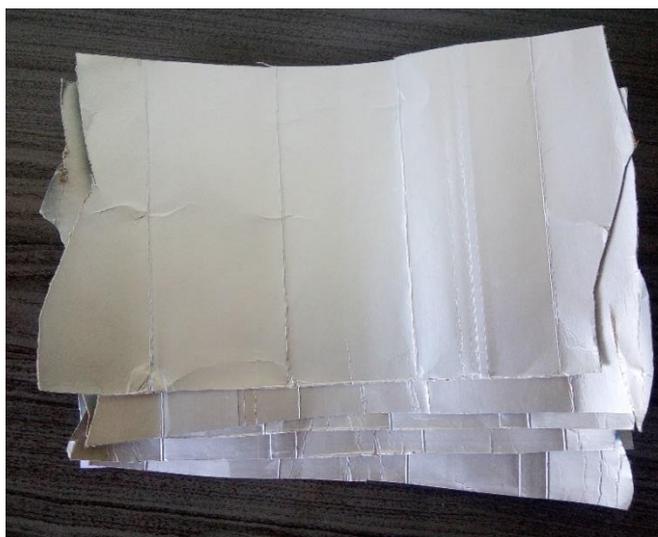
O material para o trabalho foram as embalagens cartonadas pós-consumo. Elas foram obtidas em restaurantes e também provenientes de coleta de lixo domiciliar. Com a intenção de conseguir embalagens com características mais semelhantes possíveis, foram recolhidas somente aquelas que continham leite integral ou desnatado. Para o trabalho em questão, foram contadas 100 embalagens Tetra Pak®.

4.2 Método

4.2.1 Obtenção da matéria-prima

No momento em que foram coletadas foi realizada a higienização, o interior de cada caixa de leite foi lavado com água e a mistura foi descartada através de um furo na base. Foi assumido o tempo máximo para limpeza das caixas de até 24 horas do descarte para evitar ação bacteriana. As etapas seguintes foram abertura e corte das embalagens. A partir da Figura 9 é possível analisar a condição delas após a secagem a temperatura ambiente e corte manual.

Figura 9 – Embalagens após o corte e secagem.



Fonte: Próprio Autor.

Para obtenção da matéria-prima do compósito foi necessária a retirada da celulose. Esse processo teve início com a separação manual das camadas constituintes das embalagens.

Primeiramente foi retirada a película externa da embalagem, contendo uma camada de polietileno e resquícios de papel. Em seguida, o mesmo foi feito com a parte interna, contendo a lâmina de alumínio e camadas de polietileno, tendo também restos de papelão. Para tentar retirar o máximo da celulose, os dois tipos de materiais foram imersos em um recipiente com 5 litros de água e mantido em repouso por 24 horas. Nessa etapa foram usadas 50 embalagens e posteriormente o processo foi feito novamente para o restante das caixas de leite. A intenção foi promover a hidratação das fibras de celulose pois a absorção da água facilita a sua retirada. As camadas imersas no recipiente contendo água são mostradas na Figura 10.

Figura 10 – Embalagens no tanque com água.



Fonte: Próprio Autor.

Após hidratadas as camadas foram direcionadas para um tanque com 5 litros de água. O tanque usado era da marca Colormaq® e modelo LCB10 e capacidade para 10 kg. O objetivo da sua utilização foi facilitar a retirada da celulose através da agitação mecânica. Para isso, foram usados 3 ciclos completos na máquina. De acordo com as especificações da máquina, cada ciclo tem rotação de 1640 rpm e frequência de 60 Hz. O aspecto do material no tanque durante os ciclos pode ser visualizado na Figura 11.

Figura 11 – Embalagens no tanque com agitação.



Fonte: Próprio Autor.

No final dessa etapa uma escova foi usada para retirar o restante de celulose e houve a secagem das camadas com um pano seco e à temperatura ambiente. A mistura formada por água e celulose foi descartada. Foram obtidos dois materiais diferentes: lâminas de alumínio contendo finas camadas de polietileno e películas de polietileno, provenientes da parte frontal da embalagem.

4.2.2 Obtenção das placas do compósito

Para confecção das placas do compósito foi usada uma prensa hidráulica com aquecimento da marca Solab® e modelo SL-11. O molde usado para preparação das amostras tinha a dimensões de 1,0 mm de espessura, 100 mm de largura e 150 mm de comprimento. Quatro situações diferentes foram criadas durante a preparação para verificar a influência de parâmetros distintos. Os compósitos obtidos apresentaram aproximadamente a relação 80 % de polietileno e 20 % de alumínio. Apesar dos diferentes métodos de preparação, os parâmetros operacionais usados na prensagem foram os mesmos.

Para atingir a espessura requerida 10 lâminas de alumínio foram sobrepostas e levadas para prensagem. A prensa hidráulica com aquecimento foi configurada para atingir a temperatura de 160 °C de modo a garantir que nessa temperatura o polietileno de baixa densidade atinja a temperatura de fusão. Após colocar o material na prensa foram

cronometrados 5 minutos para o polímero atingir a completa fusão do polímero e em seguida foi realizado o processo de degasagem.

Com intenção de evitar defeitos como poros e bolhas no material, a degasagem foi realizada submetendo o material a pressão de 2,5 tf e retirado o esforço. Em seguida, o processo foi repetido para os valores de pressão de 5,0 tf, 7,5 tf e 10 tf. Posteriormente, o material foi submetido a uma pressão de 10 tf durante 7 minutos, com atenção para certificar que o mesmo valor de pressão se mantivesse durante toda prensagem. Ao final, o material foi resfriado na bancada metálica por 30 minutos. Pesos foram colocados em cima do material durante resfriamento para melhorar a qualidade da superfície do produto final. Para cada condição foram feitas duas placas do material compósito para posteriormente fazer os corpos de prova.

4.2.2.1 Condição 01: Lâminas inteiras de Al (com PE)

Para atingir a espessura requerida de aproximadamente 1 mm foram usadas 10 lâminas de alumínio (com PE). Nessa condição as lâminas foram sobrepostas no molde e usadas inteiras para obtenção do compósito.

4.2.2.2 Condição 02: Lâminas inteiras de Al (com PE) + películas inteiras de polietileno

Para atingir a espessura requerida de aproximadamente 1 mm foram usadas 10 lâminas de alumínio (com PE) e 10 películas de polietileno. Elas foram dispostas inteiras no molde mas de forma intercalada, sendo uma lâmina de alumínio, seguida por uma de polietileno e assim sucessivamente, até completar 20 camadas.

4.2.2.3 Condição 03: Lâminas picotadas de alumínio (com PE)

Nessa condição, as lâminas de alumínio foram cortadas em tamanhos menores, quadrados de aproximadamente 1 mm de aresta. A intenção foi observar a influência do tamanho dos fragmentos nas propriedades do compósito. Para preparação das placas, uma lâmina foi pesada em uma balança analítica de precisão da marca BEL Engineering® 3 vezes e depois calculada a média aritmética para servir de padrão. Em seguida, foi pesado o equivalente a 10 lâminas e foi usado no molde. O cuidado para assegurar que o alumínio fragmentado seja distribuído de maneira homogênea é importante.

4.2.2.4 Condição 04: Lâminas picotadas de Al (com PE) + películas picotadas de polietileno

Nessa condição, as lâminas de alumínio e as de polietileno foram cortadas em tamanhos menores, quadrados de aproximadamente 1 mm de lado. A intenção foi observar a influência do tamanho dos fragmentos nas propriedades do compósito com maior quantidade de polímero. Para preparação das placas, uma lâmina foi pesada 3 vezes em uma balança analítica de precisão da marca BEL Engineering® e depois calculada a média aritmética para servir de padrão. Em seguida, foi pesado o equivalente a 10 lâminas e foi usado no molde. O procedimento foi repetido com a película de polietileno de baixa densidade.

Em seguida os dois tipos de materiais foram misturados antes de serem colocados no molde. O cuidado para assegurar que o material fragmentado seja distribuído de maneira homogênea é importante.

4.2.3 Obtenção dos corpos de prova

Para a confecção dos corpos de prova foi utilizada uma prensa hidráulica da marca Manley Division®, categoria HP-25 e modelo P 1083. As placas foram posicionadas em baixo do pistão e foi realizada uma pressão na faixa de 2 a 3 tf para realizar o corte. A partir de cada placa produzida foi possível obter quatro corpos de prova, totalizando 8 amostras para cada situação e 32 no total.

No final do processo, o corpo de prova padrão do molde para o corte apresentou as seguintes dimensões: 37 mm de comprimento útil, 5,60 mm de largura do comprimento útil e espessura de 1,0 mm.

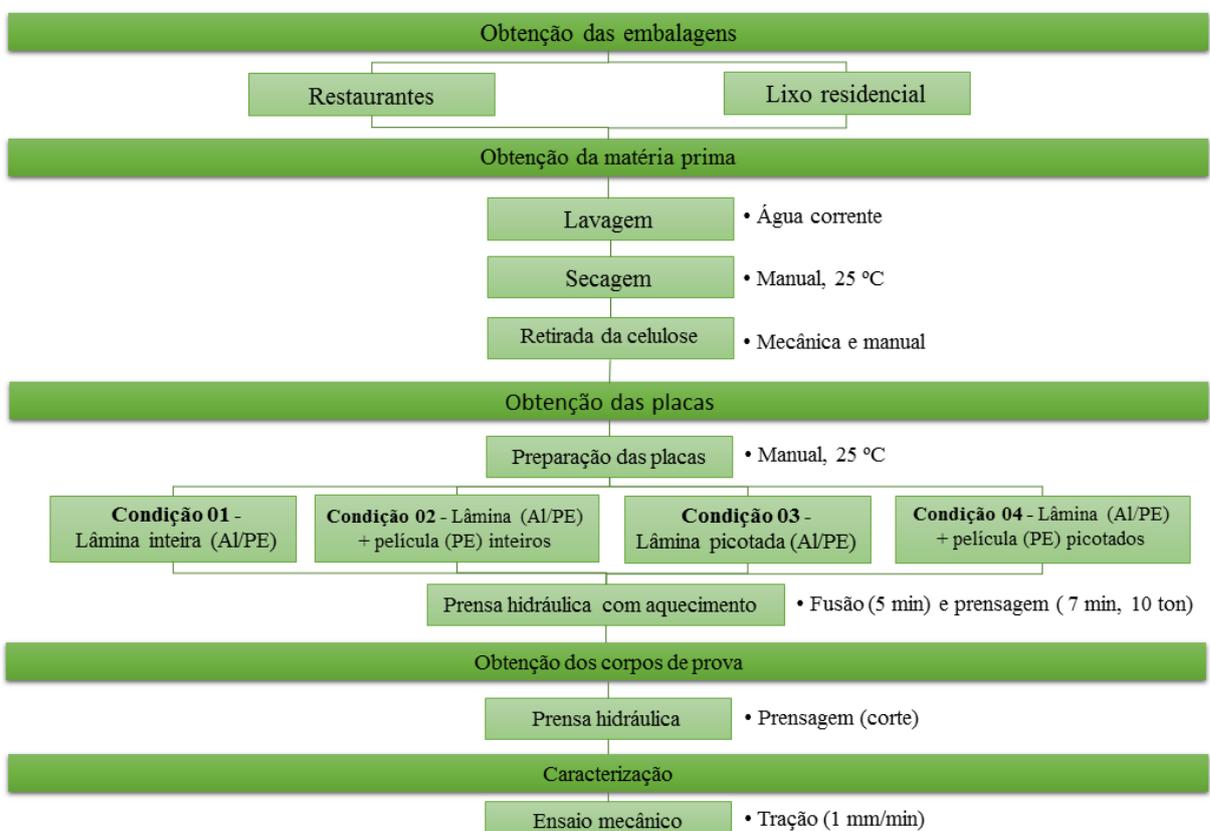
4.2.4 Ensaio mecânico

Os corpos de prova foram submetidos ao ensaio de tração para obter informações específicas de cada condição de processamento. Foi usada a máquina universal de ensaios mecânicos da marca Shimadzu® e modelo AG-X. Em cada amostra foram feitas três medições de espessura no início, meio e fim do comprimento útil, seguida da média aritmética dos valores. O procedimento se repetiu para a largura do comprimento útil do corpo de prova, obtendo também a média aritmética.

Em seguida, a amostra foi levada para a máquina de ensaios mecânicos com a célula de carga de 10 kN e a velocidade do ensaio que apresentou gráficos mais relevantes foi de 1,0 mm/min. Finalizado o ensaio, o gráfico Tensão x Deformação foi construído para se obter os seguintes valores do material: limite de escoamento, módulo de elasticidade, alongamento e limite de resistência.

De modo sucinto, a metodologia aplicada no trabalho pode ser visualizada a partir da Figura 12.

Figura 12 - Fluxograma da metodologia aplicada no trabalho.



Fonte: Próprio autor.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 Resultado da obtenção da matéria prima

Após a etapa de reciclagem das embalagens cartonadas e desagregação das fibras de celulose foi obtida a matéria prima para a produção do compósito. A película de polietileno e a lâmina de alumínio podem ser respectivamente observadas na Figura 13.

Figura 13 – Matéria prima para a produção do compósito: película de polietileno e lâmina de alumínio, respectivamente.



Fonte: Próprio Autor.

5.2 Resultados das placas do compósito

Para a confecção das placas de compósito com matéria prima picotada foi calculado o peso padrão de uma lâmina de alumínio e da película de polietileno. O valor obtido foi de $1,31 \text{ g} \pm 0,04 \text{ g}$ para a lâmina de alumínio (com PE) e $0,282 \text{ g} \pm 0,003 \text{ g}$ para a película de polietileno. A Tabela 4 contém os três valores da pesagem de uma lâmina e a média aritmética.

Tabela 4 - Valores de pesagem de uma lâmina de alumínio (com PE) e da película de polietileno.

Medições	Lâmina de alumínio (com PE)	Película de polietileno
1 ^a	1,3059 g	0,2860 g
2 ^a	1,3080 g	0,2815 g
3 ^a	1,3975 g	0,2781 g
Média	1,31 g ± 0,04 g	0,282 g ± 0,003 g

Fonte: Próprio autor.

Em seguida, foi feita a equivalência de peso de 10 lâminas picotadas. Portanto, o peso equivalente das amostras deveria ser de 13,071 g e 2,817 g para a matéria prima da lâmina e da película, respectivamente. Após a pesagem, o valor real obtido variou entre 13,071 g e 13,076 g nas lâminas de alumínio e 2,817 g e 2,819 g nas películas de polietileno. O valor das pesagens para preparação de cada placa está exibido na Tabela 5.

Tabela 5 - Valores de pesagem da matéria prima para confecção das placas de compósito.

Condição de preparação	Número da placa	Lâmina de Al (com PE)		Película de Polietileno	
		Valor padrão (g)	Valor real (g)	Valor padrão (g)	Valor real (g)
Lâmina de Al	1	13,071	13,071	-	-
picotado	2	13,071	13,074	-	-
Lâmina de Al +	1	13,071	13,072	2,819	2,817
película de PE	2	13,071	13,076	2,819	2,819

Fonte: Próprio autor.

Após a prensagem e antes do ensaio de tração foi observada a superfície do material produzido. Os materiais obtidos com o uso das lâminas inteiras apresentaram uma superfície com regiões rugosas internamente mas preenchidas com uma camada polimérica deixando-a lisa e outras na qual o polímero também ficou enrugado. Já as placas dos materiais picotados apresentaram uma superfície lisa e visualmente com menor rugosidade.

Uma possível explicação para esse aspecto é a diferença do comportamento dos materiais no resfriamento. Devido valores distintos de coeficiente de dilatação do alumínio e do polietileno, ao prensá-los na configuração de lâminas inteiras, em altas temperaturas esses materiais possuem respostas diferentes a dilatação. Consequentemente, no resfriamento um material contrai mais que o outro, provocando o efeito enrugado na superfície do material. No caso do compósito em questão, como o coeficiente do polietileno é maior, ele contrai mais, provocando as dobras no alumínio. Quando esses materiais estão em menor tamanho esse efeito é suavizado causando melhor acabamento superficial.

Outra explicação pode ser o cisalhamento causado pela máquina responsável pela prensagem. Quando as lâminas estão dispostas inteiras, o cisalhamento é maior do que quando a matéria prima está fragmentada, causando as dobras na superfície do material. A diferença na rugosidade das placas de compósitos obtidos é mostrada na Figura 14.

Figura 14 – Diferença da superfície de uma amostra preparada inteira (a esquerda) e picotada (a direita).



Fonte: Próprio autor.

5.3 Resultados do ensaio de tração

Após a obtenção dos corpos de prova as medições de espessura e largura foram realizadas para obter no final o cálculo da área da seção transversal. Uma vez obtidos os valores da área da seção transversal dos corpos de prova, foi possível calcular a tensão em cada ponto obtido do ensaio de tração. Os valores das espessuras em todas as situações variaram entre 0,77 mm a 1,96 mm e da largura foram entre 4,94 mm e 6,92 mm. As Tabelas 6, 7, 8 e 9 em seguida exibem os três valores encontrados de espessura e largura do comprimento útil dos 8 corpos de prova para cada situação, assim como as respectivas média e o valor da área da seção transversal na qual a força foi aplicada.

Tabela 6 - Medições realizadas nos corpos de prova da placa de lâminas inteiras de Al.

Medições (em mm)		1	2	3	4	5	6	7	8
Espessura	1 ^a	1,28	0,84	1,15	0,77	1,19	1,09	1,27	1,25
	2 ^a	1,18	1,07	0,89	0,80	1,18	1,00	1,31	1,26
	3 ^a	1,28	1,08	0,78	0,82	1,24	0,94	1,33	1,09
	Média	1,24 ± 0,05	1,0 ± 0,1	1,0 ± 0,2	0,79 ± 0,02	1,20 ± 0,03	1,01 ± 0,06	1,30 ± 0,02	1,20 ± 0,08
Largura	1 ^a	5,85	5,92	5,68	5,52	5,92	5,78	5,77	5,83
	2 ^a	5,83	5,75	5,90	5,79	5,83	5,69	5,80	5,86
	3 ^a	5,81	5,80	5,94	5,82	5,84	5,27	5,43	5,64
	Média	5,83 ± 0,02	5,82 ± 0,07	5,8 ± 0,1	5,7 ± 0,1	5,86 ± 0,04	5,6 ± 0,2	5,7 ± 0,2	5,8 ± 0,1
Área da seção (mm ²)		7,23	5,76	5,45	4,51	7,03	5,64	7,37	6,92

Fonte: Próprio autor.

Tabela 7 - Medições realizadas nos corpos de prova da placa de lâminas inteiras de Al e película de PE.

Medições (em mm)		1	2	3	4	5	6	7	8
Espessura	1 ^a	1,17	1,44	1,45	1,44	1,40	1,44	1,36	1,78
	2 ^a	1,28	1,20	1,43	1,40	1,55	1,40	1,28	1,78
	3 ^a	1,29	1,12	1,42	1,41	1,62	1,31	1,18	1,71
	Média	1,24 ± 0,05	1,3 ± 0,1	1,43 ± 0,01	1,41 ± 0,02	1,52 ± 0,09	1,38 ± 0,05	1,27 ± 0,07	1,73 ± 0,03
Largura	1 ^a	5,00	5,77	6,03	5,70	6,25	5,98	6,00	5,62
	2 ^a	5,96	5,71	6,03	5,77	5,50	6,43	5,87	5,91
	3 ^a	5,81	5,87	5,83	6,00	6,92	6,27	5,70	6,21
	Média	5,6 ± 0,4	5,78 ± 0,07	5,96 ± 0,09	5,8 ± 0,1	6,2 ± 0,6	6,2 ± 0,2	5,9 ± 0,1	5,9 ± 0,2
Área da seção (mm ²)		7,23	6,93	7,23	8,52	8,21	9,45	8,58	7,43

Fonte: Próprio autor.

Tabela 8 - Medições realizadas nos corpos de prova da placa de Al picotado.

Medições (em mm)		1	2	3	4	5	6	7	8
Espessura	1 ^a	1,04	0,99	1,09	0,99	1,03	1,05	0,90	1,03
	2 ^a	1,02	0,99	1,08	1,10	0,79	1,10	0,95	1,11
	3 ^a	1,03	0,99	1,03	1,01	0,85	1,96	1,05	1,05
	Média	1,03 ± 0,01	0,99	1,06 ± 0,03	1,04 ± 0,05	0,89 ± 0,10	1,4 ± 0,4	0,96 ± 0,06	1,06 ± 0,03
Largura	1 ^a	6,25	6,12	6,51	6,10	5,59	5,52	5,81	6,10
	2 ^a	6,37	5,91	6,24	6,32	5,41	4,94	5,92	6,19
	3 ^a	5,98	6,21	6,52	5,83	5,98	5,12	5,72	5,61
	Média	6,2 ± 0,2	6,1 ± 0,1	6,4 ± 0,1	6,1 ± 0,2	5,7 ± 0,2	5,2 ± 0,2	5,81 ± 0,08	6,0 ± 0,3
Área da seção (mm ²)		6,39	6,02	6,81	6,32	5,04	7,11	5,58	6,33

Fonte: Próprio autor.

Tabela 9 - Medições realizadas nos corpos de prova da placa da lâmina de Al e película de PE picotados.

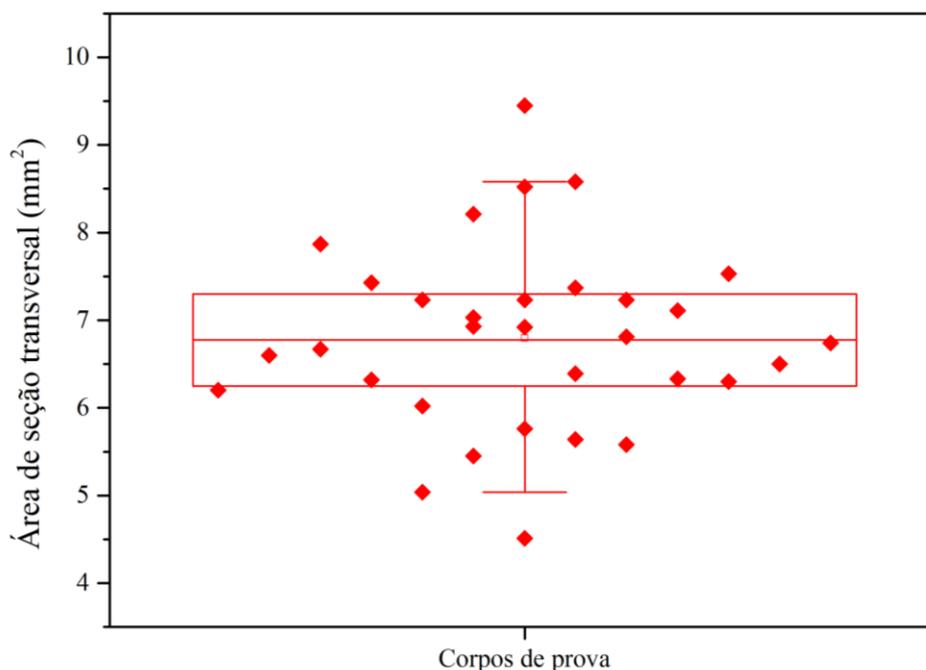
Medições (em mm)		1	2	3	4	5	6	7	8
Espessura	1 ^a	0,98	1,30	1,13	1,14	1,23	1,05	1,08	1,11
	2 ^a	1,18	1,26	1,08	1,24	1,21	1,15	1,04	1,15
	3 ^a	1,19	1,17	1,00	1,04	1,09	1,07	1,09	1,21
	Média	1,1 ± 0,1	1,24 ± 0,05	1,07 ± 0,05	1,14 ± 0,08	1,17 ± 0,06	1,09 ± 0,04	1,07 ± 0,02	1,15 ± 0,04
Largura	1 ^a	5,88	6,00	5,86	5,65	6,65	5,81	5,40	5,87
	2 ^a	5,99	6,68	5,90	5,95	6,49	6,22	5,91	6,02
	3 ^a	6,17	6,37	5,91	5,77	6,20	5,84	6,06	5,69
	Média	6,0 ± 0,1	6,4 ± 0,3	5,89 ± 0,02	5,8 ± 0,1	6,4 ± 0,2	6,0 ± 0,2	5,8 ± 0,3	5,9 ± 0,1
Área da seção (mm ²)		6,67	7,87	6,30	6,60	7,53	6,50	6,20	6,74

Fonte: Próprio autor.

Pela análise dos resultados apresentado é possível afirmar que há variação nas áreas das seções transversais dos corpos de prova. Para evitar resultados errôneos nos cálculos de tensão cada corpo de prova foi ensaiado com sua própria área de seção transversal. De modo ilustrativo, os valores das áreas encontradas são mostrados na Figura 15. Os losangos são os valores encontrados em cada corpo de prova. O retângulo grande é formado três retas

horizontais sendo uma no meio (mediana), uma em cima (quartil superior) e uma embaixo (quartil inferior). O quadrado menor representa a média dos valores encontrados.

Figura 15 - Variação dos valores de área obtidos para os corpos de prova.



Fonte: Próprio autor.

A partir da figura é possível visualizar informações a respeito da dispersão dos resultados apresentados. No diagrama de caixa os valores da média e mediana estão próximos, o que resulta em uma distribuição do tipo normal. Dessa forma pode-se concluir que os resultados dos valores encontrados das áreas são apenas valores estatísticos aleatórios, sem tendência de erros do processo.

Entre os principais fatores para justificar a grande variação de resultados estão as incertezas acumuladas durante todo o processamento. Inicialmente há incertezas na coleta das embalagens, já que cada uma pode ter passado por condições de processamento distintas. Em seguida, a etapa de retirada da celulose não é 100 % eficiente, deixando fragmentos das fibras de celulose que podem afetar as dimensões do material obtido.

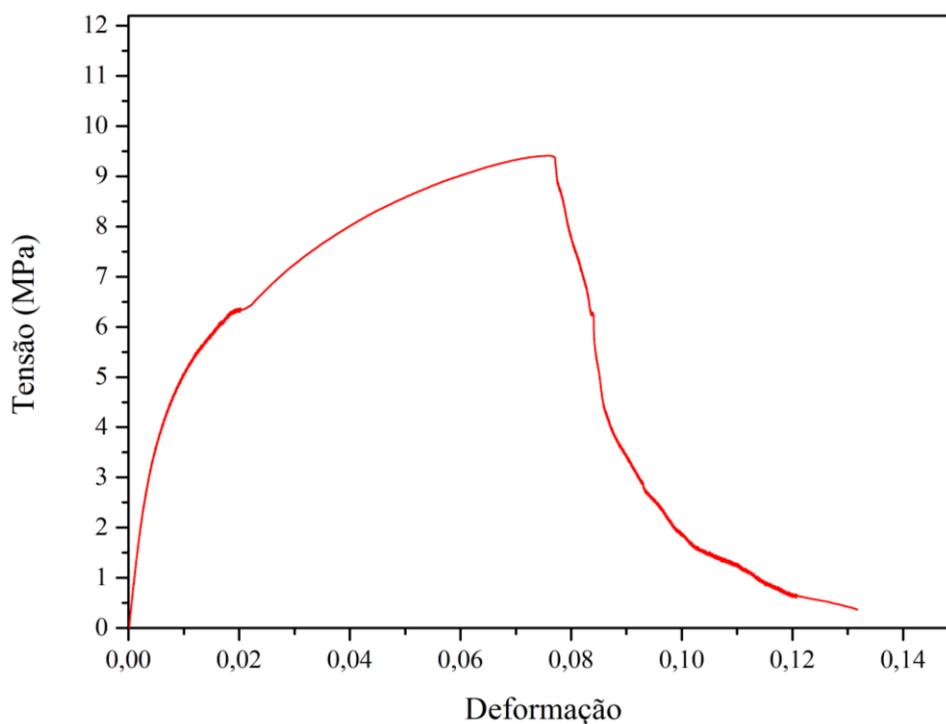
Na etapa da prensagem com aquecimento há diversos fatores para justificar a diferença das dimensões. Um deles é o aquecimento que pode não ter sido uniforme em todo molde do material, por isso foi usada a temperatura de 160 °C para tentar garantir que todo polímero havia sido fundido, mas ainda assim podem haver regiões que não atingiram a T_m . Outro fator é o paralelismo das chapas que irão prensar o material. Como elas não estavam totalmente

alinhadas, a prensagem pode ter deixado regiões com pressão menor do que a requisitada, de 10 tf. Portanto, todos esses fatores somados justificam a variação encontrada nos valores de espessura e largura dos corpos de prova.

5.3.1 Condição 01: Lâminas inteiras de alumínio e polietileno

Foram plotados os gráficos da curva Tensão *versus* Deformação e numerados de 01 a 08 para representar a condição 01. A representação da curva característica de um corpo de prova obtido nessa condição é apresentada na Figura 16, que representa a amostra número 3.

Figura 16 – Curva Tensão *versus* Deformação do corpo de prova número 3 da condição 01.



Fonte: Próprio autor.

Após os cálculos das propriedades mecânicas das amostras nessa condição foram encontrados os seguintes valores da média e desvio padrão: módulo de elasticidade $806 \text{ MPa} \pm 310 \text{ MPa}$, limite de escoamento $3,9 \text{ MPa} \pm 0,3 \text{ MPa}$, alongamento $0,060 \pm 0,009$ e o limite de resistência de $8,5 \text{ MPa} \pm 0,6 \text{ MPa}$. Os valores obtidos para cada corpo de prova, assim como a média aritmética, são exibidos na Tabela 10.

Tabela 10 - Valores de módulo de elasticidade, limite de escoamento, alongamento e o limite de resistência respectivamente de cada corpo de prova submetido a condição 01.

Propriedade	Amostra da placa da lâmina de Al com PE								Média	Desvio padrão
	1	2	3	4	5	6	7	8		
Modulo de elasticidade (MPa)	550,43	632,33	954,27	582,87	1268,00	559,64	1329,13	569,24	806	310
Limite de escoamento (MPa)	4,00	4,53	3,86	4,09	3,78	3,58	4,07	3,31	3,9	0,3
Alongamento	0,0621	0,0509	0,0647	0,0456	0,0512	0,0697	0,0628	0,0746	0,060	0,009
Limite de resistência (MPa)	7,70	8,50	9,40	8,74	8,46	9,14	8,46	7,58	8,5	0,6

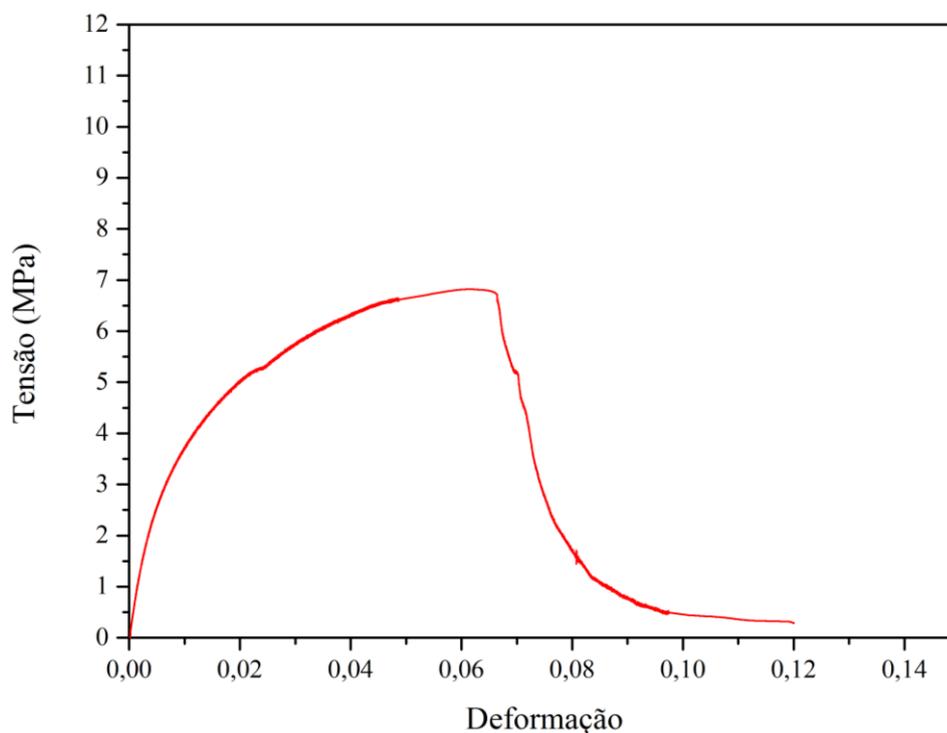
Fonte: Próprio autor.

5.3.2 Condição 02: Lâminas inteiras de Al (com PE) + películas inteiras de polietileno

Foram plotados os gráficos da curva Tensão *versus* Deformação e numerados de 01 a 08 para representar a condição 02. A representação da curva característica de um corpo de prova obtido nessa condição é apresentada na Figura 17, que representa a amostra número 1.

Após os cálculos das propriedades mecânicas das amostras nessa condição foram encontrados os seguintes valores da média e desvio padrão: módulo de elasticidade 711 MPa \pm 181 MPa, limite de escoamento 2,8 MPa \pm 0,5 MPa, alongamento 0,05 \pm 0,01e o limite de resistência de 7,0 MPa \pm 1,0 MPa. Os valores obtidos para cada corpo de prova, assim como a média aritmética, são exibidos na Tabela 11.

Figura 17 - Curva Tensão *versus* Deformação do corpo de prova número 1 da condição 02.



Fonte: Próprio autor.

Tabela 11 - Valores de módulo de elasticidade, limite de escoamento, alongamento e o limite de resistência respectivamente de cada corpo de prova submetido a condição 02.

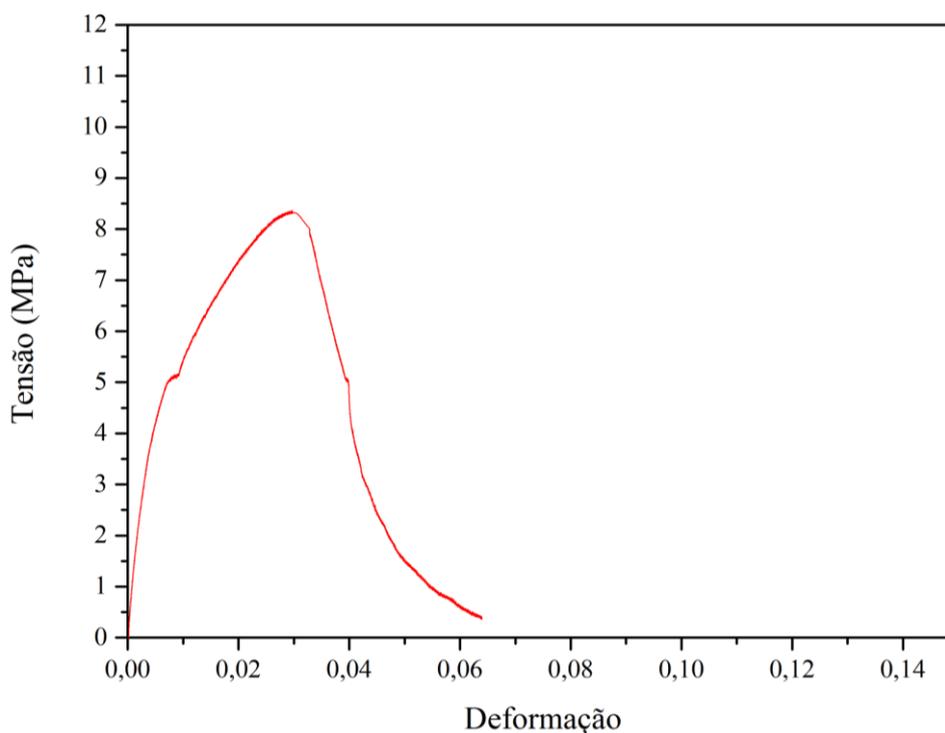
Propriedade	Amostra da placa da lâmina de Al (com PE) + película de PE								Média	Desvio padrão
	1	2	3	4	5	6	7	8		
Modulo de elasticidade (MPa)	658,81	592,53	1100,79	833,58	1017,49	823,37	723,37	594,21	711	181
Limite de escoamento (MPa)	2,81	2,73	3,28	2,54	3,08	3,56	2,62	1,84	2,8	0,5
Alongamento	0,0504	0,0696	0,0558	0,0438	0,0255	0,0572	0,0476	0,0401	0,05	0,01
Limite de resistência (MPa)	6,82	7,59	8,09	5,86	5,84	8,03	6,85	5,27	7,0	1,0

Fonte: Próprio autor.

5.3.3 Condição 03: Lâminas picotadas de alumínio (com PE)

Foram plotados os gráficos da curva Tensão *versus* Deformação e numerados de 01 a 08 para representar a condição 03. A representação da curva característica de um corpo de prova obtido nessa condição é apresentada na Figura 18, que representa a amostra número 7.

Figura 18 – Curva Tensão *versus* Deformação do corpo de prova número 7 da condição 03.



Fonte: Próprio autor.

Após os cálculos das propriedades mecânicas das amostras nessa condição foram encontrados os seguintes valores da média e desvio padrão: módulo de elasticidade $981 \text{ MPa} \pm 340 \text{ MPa}$, limite de escoamento $3,5 \text{ MPa} \pm 0,8 \text{ MPa}$, alongamento $0,02 \pm 0,02$ e o limite de resistência de $6,2 \text{ MPa} \pm 2,3 \text{ MPa}$. Os valores obtidos para cada corpo de prova, assim como a média aritmética, são exibidos na Tabela 12. O corpo de prova número 5 foi descartado do cálculo da média das propriedades pois antes do ensaio foi percebido um rasgo no comprimento útil. Como esse defeito poderia influenciar os resultados, o ensaio foi feito e os parâmetros em questão foram calculados, porém não foram adicionados no somatório das outras amostras.

Tabela 12 – Valores de módulo de elasticidade, limite de escoamento, alongamento e o limite de resistência respectivamente de cada corpo de prova submetido a condição 03.

Propriedade	Amostra da placa da lâmina de Al (com PE) picotads								Média	Desvio padrão
	1	2	3	4	5	6	7	8		
Módulo de elasticidade (MPa)	760,86	505,11	1182,29	1084,87	183,97	531,30	1126,75	1172,30	909	262
Limite de escoamento (MPa)	2,84	3,39	3,40	3,20	1,31	2,26	4,66	4,94	3,5	0,8
Alongamento	0,0107	0,0187	0,0108	0,0196	0,0033	0,0110	0,0215	0,0748	0,02	0,02
Limite de resistência (MPa)	4,78	5,02	4,84	5,89	1,45	3,27	8,37	11,05	6,2	2,3

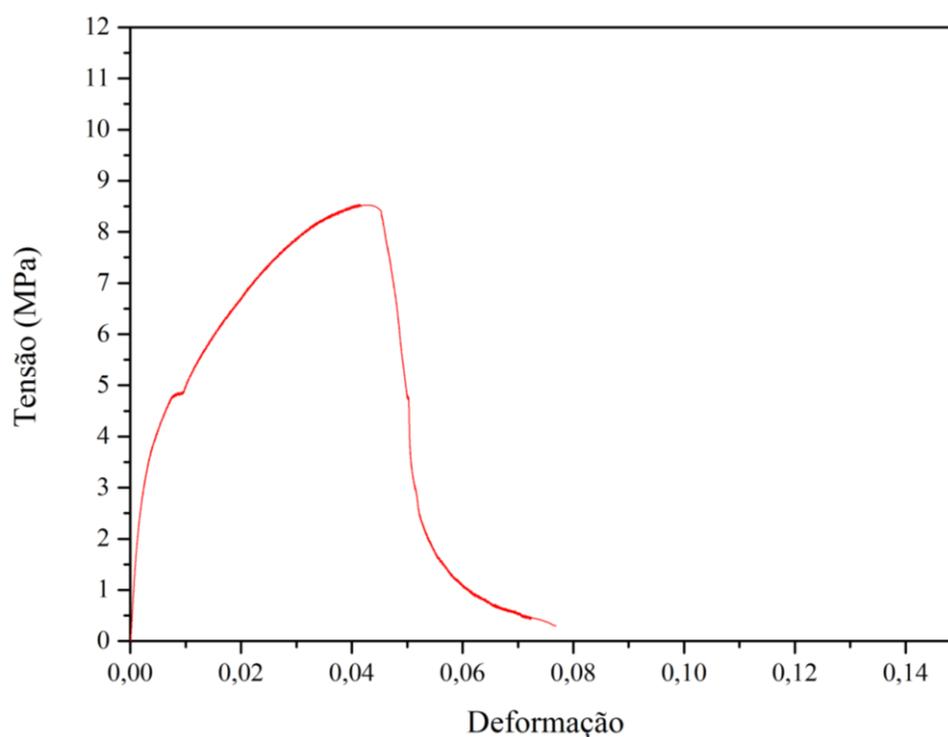
Fonte: Próprio autor.

5.3.4 Condição 04: Lâminas picotadas de Al (com PE) + películas picotadas de polietileno

Foram plotados os gráficos da curva Tensão *versus* Deformação e numerados de 01 a 08 para representar a condição 04. A representação da curva característica de um corpo de prova obtido nessa condição é apresentada na Figura 19, que representa a amostra número 8.

Após os cálculos das propriedades mecânicas das amostras nessa condição foram encontrados os seguintes valores da média e desvio padrão: módulo de elasticidade 1654 MPa \pm 176 MPa, limite de escoamento 4,1 MPa \pm 0,7 MPa, alongamento 0,04 \pm 0,01 e o limite de resistência de 9,3 MPa \pm 1,5 MPa. Os valores obtidos para cada corpo de prova, assim como a média aritmética, são exibidos na Tabela 13.

Figura 19 - Curva Tensão *versus* Deformação do corpo de prova número 8 da condição 04.



Fonte: Próprio autor.

Tabela 13 - Valores de módulo de elasticidade, limite de escoamento, alongamento e o limite de resistência respectivamente de cada corpo de prova submetido a condição 04.

Propriedade	Amostra da placa da lâmina de Al (com PE) + película de PE picotados								Média	Desvio Padrão
	1	2	3	4	5	6	7	8		
Modulo de elasticidade (MPa)	1565,9	1597,4	1343,8	1541,7	1675,9	1765,7	2032,8	1709,8	1654	176
Limite de escoamento (MPa)	3,33	3,98	3,79	5,16	3,80	3,74	5,49	3,77	4,1	0,7
Alongamento	0,0395	0,0407	0,0319	0,0696	0,0536	0,0272	0,0469	0,0384	0,04	0,01
Limite de resistência (MPa)	7,69	9,53	8,67	11,55	9,01	7,31	11,81	8,54	9,3	1,5

Fonte: Próprio autor.

5.4 Discussão dos resultados das propriedades mecânicas

Após a análise das 4 condições, para análise das propriedades mecânicas, foram comparadas cada situação e os materiais puros. Segundo ABAL (2017), Cerqueira (2006),

Gomes (2014), Mano (1991) e Rocha (2014) os materiais puros usados no compósito apresentam as propriedades mecânicas descritas na Tabela 14.

Tabela 14 - Propriedades mecânicas do polietileno e alumínio.

Propriedades	Material	
	Polietileno puro	Alumínio puro
Modulo de elasticidade	102 MPa a 240 MPa 52, 15 MPa	58,9 GPa a 70,0 GPa
Limite de escoamento	1,37 MPa	12,7 MPa
Alongamento	100 % a 800 %	Depende da espessura do corpo de prova
Limite de resistência	1,37 MPa 7,8 MPa	48 MPa

Fonte: ABAL (2017), Cerqueira (2006), Gomes (2014), Mano (1991), Rocha (2014).

A diferença nos valores obtidos das propriedades mecânicas do polietileno puro pode ser justificada pelos diferentes processamentos e parâmetros de ensaios usados nos trabalhos dos autores.

Para comparar os resultados das quatro condições de preparação e cada propriedade mecânica, foram plotados diagramas de caixa que contêm informações sobre a variação dos resultados. Para o estudo do trabalho realizado foram considerados os valores da média e calculado o desvio padrão.

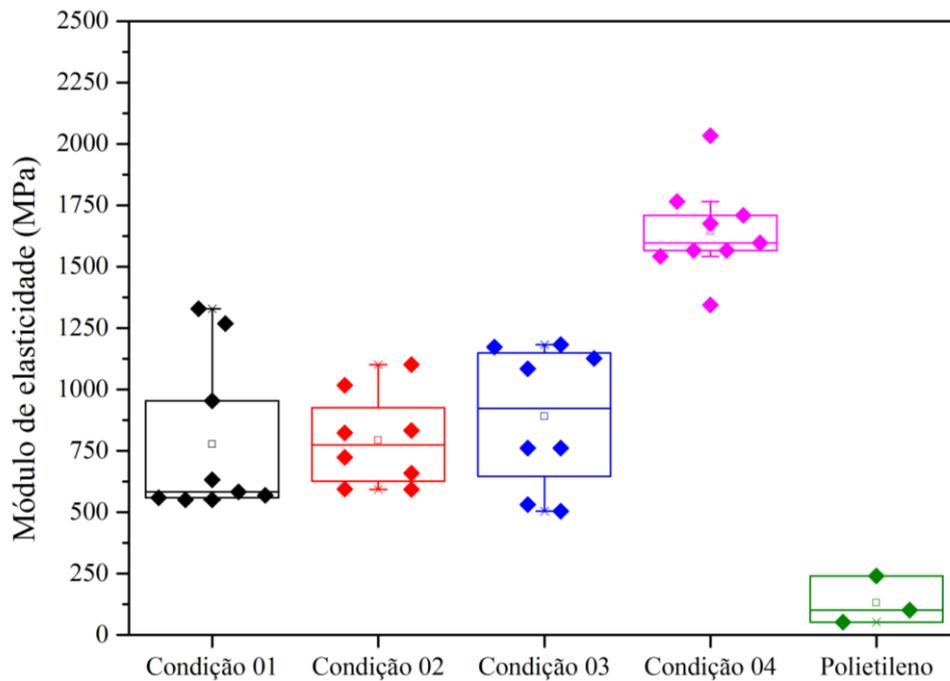
5.4.1 Módulo de elasticidade (*E*)

A avaliação do módulo de elasticidade (ou módulo de Young) representa a rigidez do material. Calculado através da inclinação da parte reta da curva Tensão *versus* Deformação, ele apresenta a resistência do material a deformação elástica (SHACKELFORD, 2008). Quando comparadas as quatro condições tem-se os seguintes valores: 806 MPa \pm 310 MPa (Condição 01), 711 MPa \pm 181 MPa (Condição 02), 987 MPa \pm 340 MPa (Condição 03) e 1654 MPa \pm 176 (Condição 04).

De acordo com os resultados obtidos, todas as 4 situações apresentaram módulo de elasticidade superior ao polietileno puro e inferior ao alumínio puro. Isso comprova que os compósitos obtidos possuem maior rigidez que o polímero puro, segundo a bibliografia. Entre

as situações apresentadas, as duas primeiras apresentaram uma média semelhante, enquanto as duas últimas tiveram valores mais elevados de E. A quarta condição, com o alumínio e polietileno particulados, foi a que apresentou a maior média e o maior valor entre todas as amostras. Portanto, para análise do módulo de elasticidade, a prensagem com fragmentos menores proporcionou melhores resultados de rigidez, já que a inclinação da parte reta do regime elástico foi maior. O diagrama de caixa com os resultados do módulo de elasticidade para todas as condições e o polietileno puro é apresentado na Figura 20.

Figura 20 - Diagrama de caixa do Módulo de elasticidade das 04 condições de preparação e do polietileno puro.



Fonte: Próprio autor.

Ao analisar a dispersão das amostras, a condição 01 foi a que apresentou maior discrepância entre os valores da média e mediana, indicando que provavelmente os três pontos com módulo acima de 750 MPa estão fora do comportamento padrão.

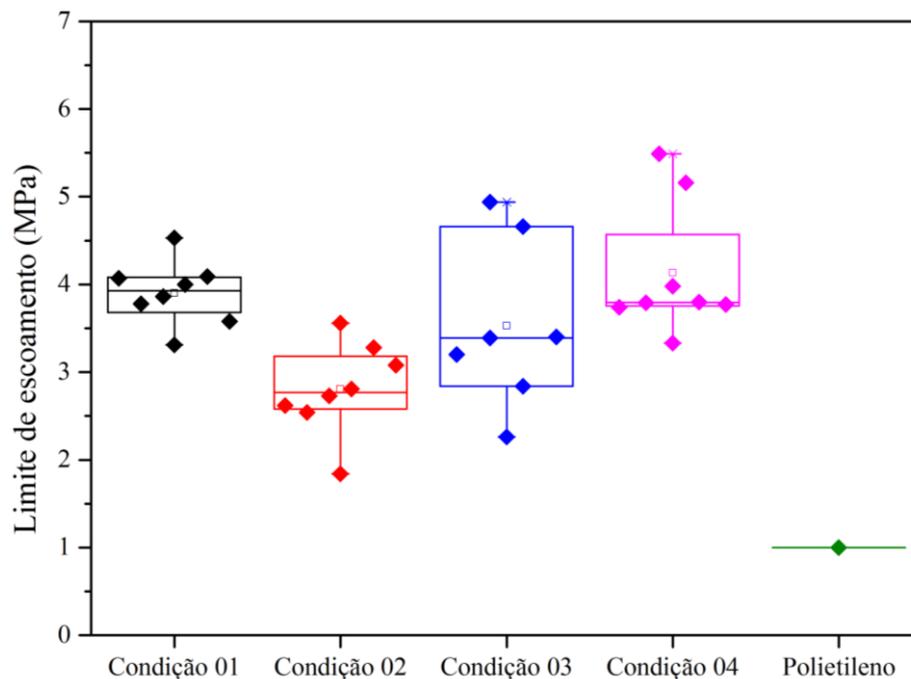
5.4.2 Limite de escoamento

A avaliação do Limite de escoamento representa a resistência do material a deformação plástica. É calculado através do valor de tensão obtido quando há a interseção da tensão com a reta do módulo de Young deslocada para a deformação de 0,002 (ou 0,2 %) (SHACKELFORD, 2008). Quando comparadas as quatro condições tem-se os seguintes valores:

3,9 MPa \pm 0,3 MPa (Condição 01), 3,5 MPa \pm 0,8 MPa (Condição 02), 3,48 MPa \pm 1,1 MPa (Condição 03) e 4,1 MPa \pm 0,7 (Condição 04).

Os resultados mostram que a condição que obteve o maior valor de limite de escoamento foi a 04, na qual a matéria prima apresentava maior área de contato por exibir menor tamanho de fragmento. Nessa condição também foi encontrado o maior valor de limite de escoamento de todos os corpos de prova ensaiados. Os menos valores foram obtidos na condição 02, que o compósito foi obtido com lâminas inteiras e intercaladas entre o alumínio e o polietileno. Já a condição 03 teve a maior dispersão de resultados, indo desde valores muito baixos, próximos do mais baixo, quanto valores mais altos, próximo do mais alto. Uma das justificativas para essa variação pode ser a dificuldade na homogeneização da deposição do material no molde quando ele está na forma particulada. Assim, nem todos os corpos de prova exibem as mesmas propriedades. Quando comparados com o polietileno puro, os materiais apresentaram valores superiores, mostrando que o PEBD suporta menos esforços antes de iniciar a deformação permanente. O diagrama de caixa com os resultados do limite de escoamento para todas as condições e o polietileno puro é apresentado na Figura 21.

Figura 21 - Diagrama de caixa do limite de escoamento das 04 condições de preparação e do polietileno puro.



Fonte: Próprio autor.

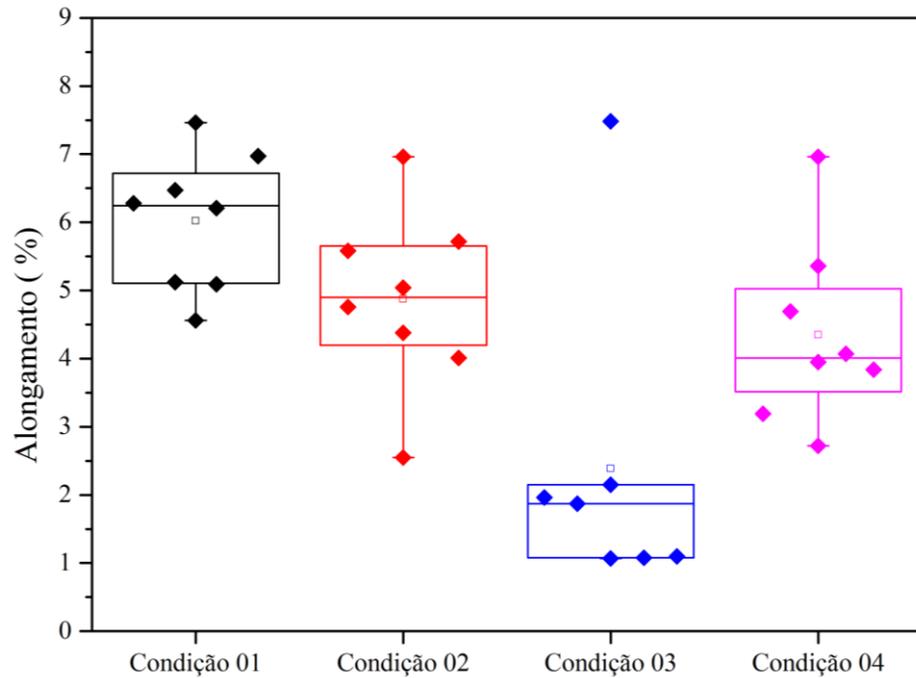
5.4.3 Alongamento

A avaliação do alongamento do material está relacionada ao quanto de deformação plástica o material suporta sem chegar a fratura. É uma propriedade importante para avaliar a ductilidade do material (ASKELND, 2008). Quando comparadas as quatro condições tem-se os seguintes valores: $6 \% \pm 0,9 \%$ (Condição 01), $5 \% \pm 1 \%$ (Condição 02), $2 \% \pm 2 \%$ (Condição 03) e $4 \% \pm 1 \%$ (Condição 04).

Como o material obtido é um compósito, a curva Tensão *versus* Deformação é diferente dos materiais quando estão puros e portanto o cálculo para o alongamento também. Ele foi calculado até o momento que houve a fratura das fibras de alumínio que atuavam como reforço. Ainda que a matriz de polietileno sofria deformação plástica, o valor do final do ensaio para o cálculo do alongamento foi até o valor máximo de tensão.

Os resultados obtidos mostram que a condição que obteve maior alongamento foi a 01, portanto foi a que material se mostrou mais dúctil. Já a situação 03 na qual haviam as lâminas de Al com PE picotadas apresentou a menor média do alongamento, ainda que uma amostra tenha obtido um alto valor de alongamento (7,48 %). Além disso, essa condição apresentou valores de média e distintos, sendo que a média obtida foi maior que a maioria dos valores. Isso é justificado pelo valor de uma amostra que foi considerado para o cálculo da média mas que não foi incluído para a mediana. O diagrama de caixa com os resultados do alongamento para todas as condições e o polietileno puro é apresentado na Figura 22.

Figura 22 - Diagrama de caixa do alongamento das 04 condições de preparação.



Fonte: Próprio autor.

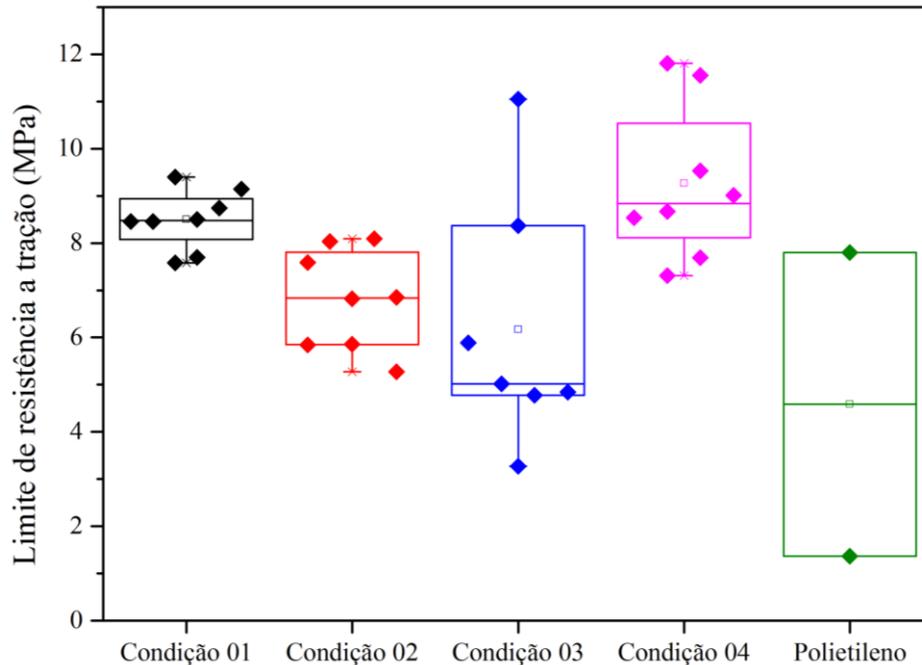
5.4.4 Limite de resistência a tração

O limite de resistência a tração do material é o ponto máximo da tensão sofrida por ele durante o ensaio de tração. No caso dos compósitos produzidos o ponto máximo coincidiu com o momento da fratura, no qual o material sofreu deformação plástica até atingir a ruptura do agente reforçante. Quando comparadas as quatro condições tem-se os seguintes valores: $8,5 \text{ MPa} \pm 0,6 \%$ (Condição 01), $7 \text{ MPa} \pm 1 \%$ (Condição 02), $6,2 \text{ MPa} \pm 2,3 \text{ MPa}$ (Condição 03) e $9,3 \text{ MPa} \pm 1,5 \text{ MPa}$ (Condição 04).

A partir dos resultados obtidos é possível afirmar que o material que apresentou o maior limite de resistência foi aquele submetido a condição 04. Nessa condição também foi obtido o maior valor de todas as amostras. Os valores mais dispersos foram na condição 03, pois apresentou o maior desvio padrão, o que é confirmado visualmente no diagrama de caixa. Quando comparados com os valores de do PEBD puro, todas as condições foram superiores ao limite encontrado por Gomes (2014), porém apenas as condições 01 e 04 obtiveram valores acima do limite de resistência obtido por Rocha (2014).

O diagrama de caixa com os resultados do limite de resistência a tração para todas as condições e o polietileno puro é apresentado na Figura 23.

Figura 23 - Diagrama de caixa do limite de resistência das 04 condições de preparação e do polietileno puro.



Fonte: Próprio autor.

Após a avaliação das propriedades mecânicas nas quatro condições, foi possível observar que a que obteve os valores mais elevados foi a número 04, na qual a matéria prima foi preparada com o material picotado. Nesse caso, tanto o maior teor do polímero quanto a fragmentação da matéria prima provocaram não só um melhor acabamento superficial, mas também mudanças positivas nas características do compósito.

6 SUGESTÃO DE USO

De maneira geral, os compósitos obtidos apresentaram resultados superiores quando comparados com o polietileno puro, provando a eficácia do reforço de alumínio. Entre as variadas aplicações desse polímero é possível propor a substituição dessa matéria prima polimérica pela do compósito reciclado tais como sacolas plásticas e copos de plástico. Como o processo de reciclagem das embalagens cartonadas exige tempo e muitas vezes investimento em máquinas, a produção sugerida é para um material que assim como as caixas de leite sejam consumidos em larga escala, pois assim o custo da unidade do produto é reduzido. A partir disso é recomendado o uso desse material em dois tipos diferentes de processamentos: extrusão a sopro ou termoformagem.

Na extrusão a sopro podem ser produzidas sacolas plásticas que já são amplamente utilizadas diariamente no mundo, sobretudo no Brasil. Quando solicitadas, elas são submetidas a esforços mecânicos principalmente de tração. Usar um material que além de possui maior a resistência e limite de escoamento proporciona ao material maior regime elástico, e consequentemente é possível suportar uma carga maior. Essa vantagem se torna interessante nas sacolas plásticas já que esse é um dos principais requisitos para esse material. Além disso, o fato de ser um material proveniente da reciclagem faz com que a sua produção entre para o ciclo de vida das embalagens, ao invés de deixá-las expostas no meio ambiente para decomposição. Outra vantagem é a disponibilidade de matéria prima. Como são consumidas muitas embalagens cartonadas é fácil obtê-las para processar os compósitos. No processamento, o material deve apresentar configuração semelhante a condição 04, a qual houve a fragmentação da das lâminas de alumínio e da película de polietileno. Assim, o material passaria por uma extrusão a sopro, para formação dos filmes plásticos, e em seguida, cortados para as dimensões das sacolas.

Já o processamento semelhante a rota de usada do trabalho é a termoformagem para produção de produtos como pias, baldes, copos não descartáveis. A vantagem desse material quando comparado com o processo atual com o PEBD é a combinação das propriedades de modulo de elasticidade e resistência, já que quando solicitadas esses materiais sofrem esforços de tração e estiramento. Para a produção é recomendado a condição em que houve a fragmentação da matéria prima, lâminas de alumínio e película de polietileno (condição 04). Além disso, deve ser estudada a melhor proporção entre a matriz e o agente reforçante do compósito e espessura desejada. Outra vantagem é que devido a boa condutibilidade térmica

do alumínio o processo de termoformagem pode ocorrer em temperaturas mais baixas, proporcionando economia de energia.

7 CONCLUSÕES

Entre os métodos existentes para o processo de reciclagem das embalagens cartonadas, a rota usada no trabalho foi satisfatória devido o aspecto da matéria prima obtida após a retirada da celulose. Foi possível observar que quase não havia fibras de celulose agregadas tanto nas lâminas de alumínio e polietileno, quanto nas películas de polietileno. A obtenção das placas de compósito também atingiu as expectativas pois no processamento e nos parâmetros da prensagem o produto final apresentou tolerância dimensional e bom acabamento superficial.

A etapa de caracterização e análise das propriedades mecânicas mostrou que quando prensado em menor tamanho e com adição da película de polietileno o compósito apresenta a melhor performance. Ainda que com propriedades diferentes, de modo geral, as quatro condições propostas apresentaram resultados de resistência superiores ao polietileno de baixa densidade puro. Isso comprova a eficácia do alumínio como agente reforçante no compósito. Como as embalagens cartonadas são muito consumidas na sociedade atual, foram propostos novos materiais que tem alta demanda no mercado, para desenvolver a indústria que realiza essa rota de processamento. Usando a metodologia proposta, a condição 4, na qual as lâminas de alumínio e as películas de polietileno foram fragmentadas, atingiu resultados superiores, chegando a aumentar o modulo de elasticidade em 1153 %, o limite de escoamento em aproximadamente 200 % e o limite de resistência em 100 % quando comparado com o polietileno de baixa densidade puro.

Além disso, um aspecto importante foi a estética dos materiais. O acabamento superficial das placas de compósitos quando picotadas proporcionou uma superfície lisa e com menor rugosidade quando comparada com a placas feitas com as lâminas inteiras. Portanto, do ponto de vista estético, elas foram consideradas mais adequadas para aplicação do que aquelas com as lâminas inteiras.

Por fim, o trabalho revelou-se satisfatório diante dos objetivos apresentados. A rota usada e o material obtido visam diminuir a problemática do descarte das embalagens cartonadas no meio ambiente além de ser uma alternativa viável economicamente.

8 TRABALHOS FUTUROS

São apresentadas propostas para trabalhos futuros de modo a avaliar outros parâmetros e propriedades desse compósito de modo a obter propriedades cada vez mais precisas. É deixado como sugestão realizar estudos com adição de pellets de PEBD e ver a influência deles quando comparados com polímero obtido proveniente das próprias embalagens cartonadas. Além disso, analisar diferentes concentrações da mistura alumínio e polietileno e verificar suas influências nas propriedades mecânicas.

Estudos sobre realizar o processo de extrusão com a polpa formada por alumínio e polietileno de baixa densidade também são sugeridos. Comparar com o processamento do compósito obtido na prensagem para observar a influência de cada método para em suas propriedades mecânicas e avaliar qual é mais vantajoso.

Avaliar as propriedades de condução de energia e propriedades caloríficas também são propostas para trabalhos. Com o comportamento mecânico já mapeado, torna-se importante avaliar as propriedades elétricas e caloríficas desse compósito, já que essas estão entre as características positivas do alumínio puro.

9 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABAL. Associação Brasileira do Alumínio. História/ Vantagens/ Propriedades mecânicas/ Características químicas e físicas. Disponível em: <<http://abal.org.br/aluminio/historia-do-aluminio/>>. Acesso em: jun. 2016.

ALVARENGA, Larissa Machado. **Pirólise de resíduos de embalagens cartonados e seus componentes puros**: Uma avaliação cinética. 2013. 109 f. Tese (Doutorado) - Curso de Programa de Pós Graduação em Energia, Universidade Federal do Espírito Santo, São Mateus, 2013.

ASKELAND, Donald R.; PHULÉ, Pradeep P.. **Ciência e engenharia dos materiais**. São Paulo: Cengage Learning, 2008. 594 p.

BORGES, Daliana Gomes. **Aproveitamento de embalagens cartonadas em aproveitamento de compósito de polietileno de baixa densidade**. 2007. 97 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007.

CALLISTER, William D.. **Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução**. 7. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2007. 705 p.

CEMPRE. Compromisso Empresarial para Reciclagem. Embalagens longa vida. Disponível em: <<http://cempre.org.br/artigo-publicacao/ficha-tecnica/id/9/embalagens-longa-vida>>. Acesso em: jun. 2016.

CERQUEIRA, Mario Henrique de. **Processamento do compósito LDPE/Al proveniente da reciclagem de embalagens cartonadas e desenvolvimento das suas modificações com fibras de madeira**. 2006. 121 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia de Materiais, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2006.

COUTINHO, Fernanda M. B.; MELLO, Ivana L.; MARIA, Luiz C. de Santa. Polietileno: Principais Tipos, Propriedades e Aplicações. **Polímeros: Ciência e Tecnologia**, Rio de Janeiro, v. 13, p.1-13, 2003.

D’ALESSIO, Sílvia Pimentel. Aumenta a reciclagem de embalagens “longa vida”. **Revista Celulose & Papel**, n. 62. p. 27-29, 2009.

FOELKEL, Celso. **A Reciclagem de Embalagens Cartonadas do Tipo Longa Vida**. São Paulo: Pinus letter, 2015. 15 p.

GOMES, Raphael de Oliveira. **CARACTERIZAÇÃO DE PROPRIEDADES MECÂNICAS DE PLÁSTICOS BIODEGRADÁVEIS À BASE DE AMIDO**. 2014. 54 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia de Materiais, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2014.

JALES, Fernando Fernandes. **Utilização de embalagens Tetra Pak como material de construção**. 2013. 35 f. Monografia (Especialização) - Curso de Ciência e Tecnologia, Departamento de Ciências Ambientais e Tecnológicas, Universidade Federal Rural do Semiárido, Mossoró, 2013.

MESQUITA, Fábio Agnelli. **Modificação das propriedades do polietileno de alta densidade por diferentes condições de extrusão**. 2010. 102 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2010. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3133/tde-10012011-103025/pt-br.php>>. Acesso em: 12 maio 2017.

NEVES, Fernando Luiz. **Eletrodissolução de alumínio em polpa celulósica proveniente da reciclagem de embalagens cartonadas multicamadas**. 2009. 129 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Química, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2009.

ROCHA, Julia Guedes; MULINARI, Daniella Regina. Caracterização mecânica dos compósitos de PEBD reforçados com fibras da palmeira. **Cadernos UniFOA**, Volta Redonda, p.45-53, abr. 2014.

SHACKELFORD, James F.. **Ciência dos materiais**. 6. ed. São Paulo: Pearson, 2008. 556 p.

SOUZA, Fernando Ferreira de. **Proposta metodológica para aplicação de logística reversa de embalagens cartonadas no âmbito municipal**. 2011. 123 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Meio Ambiente Urbano e Industrial, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2011.