

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO DE JOINVILLE
CURSO DE ENGENHARIA AUTOMOTIVA

RAPHAEL DE BARROS MARTINS

**CARACTERIZAÇÃO DE PROPRIEDADES MECÂNICAS DE PLACAS
COMPÓSITAS PRODUZIDAS A PARTIR DE EMBALAGENS CARTONADAS**

Joinville

2020

RAPHAEL DE BARROS MARTINS.

**CARACTERIZAÇÃO DE PROPRIEDADES MECÂNICAS DE PLACAS
COMPÓSITAS PRODUZIDAS A PARTIR DE EMBALAGENS CARTONADAS**

Trabalho apresentado como requisito para obtenção do título de bacharel no Curso de Graduação em Engenharia Automotiva do Centro Tecnológico de Joinville da Universidade Federal de Santa Catarina.

Orientador: Prof. Dr. Claudimir A. Carminatti

Joinville

2020

RAPHAEL DE BARROS MARINS

**CARACTERIZAÇÃO DE PROPRIEDADES MECÂNICAS DE PLACAS
COMPÓSITAS PRODUZIDAS A PARTIR DE EMBALAGENS CARTONADAS**

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do título de bacharel em Engenharia Automotiva, na Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico de Joinville.

Joinville (SC), 02 de outubro de 2020

Banca Examinadora:

Dr. Claudimir A. Carminatti
Orientador
Presidente

Dr. Alexandre Mikowski
Membro
Universidade Federal de Santa Catarina

Dr. Gabriel Benedet Dutra
Membro
Universidade Federal de Santa Catarina

Dedico este trabalho a meus pais, Wilson Rodrigues Martins e Maria do Carmo de Barros Martins e meus irmãos, que com muito carinho e apoio, não mediram esforços para que eu chegasse até esta etapa de minha vida.

AGRADECIMENTOS

Ao orientador pela paciência e pela ajuda na minha formação profissional e pessoal.

A Empresa Mega Telhas Ltda. que abriu as portas para acompanhar o processo, além de fornecer o material para estudo.

Ao Professor Leonardo Ulian da UFSC Campus Blumenau por ceder o laboratório para a realização do ensaio de tração.

Ao Professor Alexandre Mikowski por ter me auxiliado no tratamento dos dados obtidos nos testes.

Aos amigos que me deram força e me ajudaram a encarar os últimos anos de faculdade: Andrei, Gabriel, Gustavo, Henrique, Iago, Jhonny, Lucca, Murilo, Octávio, Vitor, Ricardo, Rubens,

“A mente que se abre a uma nova ideia jamais
voltará ao seu tamanho original”

Albert Einstein

RESUMO

A reciclagem de materiais vem se mostrando uma ótima alternativa para a redução de impacto no meio ambiente. Embalagens cartonadas tipo longa vida (LV) são utilizadas para o condicionamento de diversos tipos de produtos alimentícios, como leite e sucos. Elas são construídas com diversas camadas de diferentes materiais – papel, alumínio e polietileno, o que dificulta a sua degradação quando são descartadas diretamente no meio ambiente. Métodos foram desenvolvidos para a sua reciclagem, onde os seus diferentes materiais são separados e utilizados na elaboração de placas compósitas de polietileno de baixa densidade (PEBD) e alumínio, que podem ser utilizadas como telhas, painéis de vedação e placas. Este estudo determinou as propriedades mecânicas dureza, resistência à tração, resistência à flexão e módulo de elasticidade de placas produzidas a partir de materiais reciclados de embalagens cartonadas do tipo longa vida (LV). Foram analisadas placas compósitas com espessuras 4, 7, 10 e 12 mm contendo, em massa, 84% de polietileno e 16% de alumínio, produzidas a partir do polímero e metal recuperados da reciclagem de embalagens cartonadas do tipo longa vida. Os resultados demonstraram que as placas têm propriedades mecânicas semelhantes ao PEBD, porém com algumas propriedades melhoradas, como é o caso da dureza e da tensão máxima, o que demonstra a influência do alumínio. Para o módulo de elasticidade, placas com 4 mm de espessura apresentaram valores superiores ao valor máximo esperado para o PEBD (240 MPa), chegando a 280,45 MPa de valor médio. Os resultados obtidos neste trabalho indicam que o material compósito pode ser utilizado em diversas áreas, como, por exemplo, na indústria automotiva, permitindo um destino ecologicamente correto para os resíduos de embalagens cartonadas do tipo longa vida.

Palavras-chave: Material compósitos. Sustentabilidade. Reciclagem. Embalagens cartonadas longa vida. Propriedades mecânicas.

ABSTRACT

The recycling of materials has proved to be a great alternative for reducing impact on the environment. Long-life carton packs (LV) are used for conditioning various types of food products, such as milk and juices. They are built with several layers of different materials - paper, aluminium and polyethylene, which complicates their degradation when they are discarded directly into the environment. Methods were developed for their recycling, where their different materials are separated and used in the preparation of composite plates of low-density polyethylene (LDPE) and aluminium, which can be used as tiles, sealing panels and plates. This study determined the mechanical properties of hardness, tensile strength, flexural strength and modulus of elasticity of plates produced from recycled materials of long-life (LV) carton packs. Composite plates with thicknesses 4, 7, 10 and 12 mm were analyzed, containing by mass 84% polyethylene and 16% aluminium, produced from the polymer and metal recovered from the recycling of long-life carton packs. The results showed that the plates have mechanical properties similar to LDPE, but with some improved properties, such as the case of hardness and maximum stress, which demonstrates the influence of aluminium. For the modulus of elasticity, plates with a thickness of 4 mm showed values higher than the maximum expected value for LDPE (240 MPa), reaching 280.45 MPa of average value. The results obtained in this work indicate that the composite material can be used in several areas, such as, for example, in the automotive industry, allowing an ecologically correct destination for long-life carton packaging waste.

Keywords: Recycling, Sustainability, Carton packs long life, Composite material, Mechanical properties.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Aplicações das placas compósitas produzidas a partir do polietileno e alumínio reciclados de embalagens cartonadas longa vida.....	13
Figura 2 – Disposição final dos Resíduos Sólidos Urbanos no Brasil (toneladas/ano).	16
Figura 3 – Camadas de materiais formadoras de uma embalagem cartonada.....	18
Figura 4 – Representação esquemática da cadeia do polietileno de baixa densidade (PEBD).21	
Figura 5 – Classificação dos materiais compósitos.	25
Figura 6 – Papelão provindo de embalagens longa vida.....	26
Figura 7 – Recebimento da matéria prima.	27
Figura 8 – Aparador de Rebarbas.	28
Figura 9 – Modelo de prensa utilizado para a produção das placas compósitas.	29
Figura 10 – Marcação dos corpos de prova.....	30
Figura 11 – Máquina Universal de Ensaios.....	31
Figura 12 – Equipamento para medição da dureza Shore D.	32
Figura 13 – Placa compósita polietileno e alumínio.....	33
Figura 14 – Gabarito preenchido com polietileno e alumínio recuperados de embalagens longa vida cartonadas.	34
Figura 15 – Valores medidos para a espessura das placas compósitas para os Grupos A, B, C e D (4, 7, 12 e 10 mm, respectivamente).	36
Figura 16 – Análise estatística ANOVA para a espessura das placas compósitas.	36
Figura 17 – Curvas tensão-deformação para o material compósito polietileno e alumínio (Grupo A = 4 mm, Grupo B = 7 mm, Grupo C = 12 mm, Grupo D = 10 mm).....	38
Figura 18 – Comparação dos valores dos Grupos A, B, C e D para a tensão máxima das placas compósitas.	39
Figura 19 – Análise estatística ANOVA para os valores de tensão máxima.	41
Figura 20 – Comparação dos valores para a tensão de ruptura das placas compósitas.	43
Figura 21 – Análise estatística ANOVA para os valores de tensão de ruptura.	44
Figura 22 – Comparação dos valores para o módulo de elasticidade das placas compósitas. .	46
Figura 23 – Análise estatística ANOVA para os valores do módulo de elasticidade.....	47
Figura 24 – Análise estatística ANOVA para os valores da dureza Shore D.	49

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Propriedades do polietileno de baixa densidade (PEBD)	22
Tabela 2 – Propriedades do alumínio.....	24
Tabela 3 – Valores calculados para a espessura média em três pontos dos corpos de prova para os Grupos A a D retirados das placas compósitas.....	35
Tabela 4 – Espessura média dos corpos de prova retirados das placas compósitas	35
Tabela 5 – Valores para a tensão máxima calculados a partir das curvas tensão-deformação	39
Tabela 6 – Tensão de ruptura das placas compósitas polietileno e alumínio.....	42
Tabela 7 – Módulos de elasticidade calculados para cada corpo de prova obtido das placas compósitas formadas por polietileno e alumínio	45
Tabela 8 – Resultados da Dureza Shore D para as placas do material compósito polietileno e alumínio.....	48
Tabela 9 – Dimensões obtidas dos corpos de prova para os oito corpos de prova oriundos das quatro placas compósitas formadas por polietileno e alumínio.....	57

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANOVA – Análise de Variância

CPs – Corpos de Prova

ISWA – Associação internacional de Resíduos Sólidos

LV – Longa vida

ONU – Organização das Nações Unidas

PEBD – Polietileno de baixa densidade

PNRS – Política Nacional de Resíduos Sólidos

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	12
1.1 OBJETIVOS	13
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	15
2.1 RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS NO BRASIL.....	15
2.2 EMBALAGENS CARTONADAS	17
2.3 POLIETILENO	20
2.4 ALUMÍNIO.....	22
2.5 MATERIAIS COMPÓSITOS.....	24
2.6 PROCESSO DE PRODUÇÃO DOS COMPÓSITOS POLIETILENO/ALUMÍNIO ..	26
3 METODOLOGIA	29
3.1 ELABORAÇÃO DAS PLACAS DE MATERIAL RECICLADO	29
3.2 REALIZAÇÃO DOS ENSAIOS DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO	31
3.3 DETERMINAÇÃO DA DUREZA DOS CORPOS DE PROVA	32
3.4 ANÁLISE ESTATÍSTICA	32
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	33
4.1 PRODUÇÃO DO COMPÓSITO POLIETILENO/ALUMÍNIO	33
4.2 TENSÃO MÁXIMA	37
4.3 TENSÃO DE RUPTURA.....	42
4.4 MÓDULO DE ELASTICIDADE	45
4.5 DUREZA SHORE.....	48
5 CONCLUSÕES	51
6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	53
REFERÊNCIAS.....	54

1 INTRODUÇÃO

A questão da reciclagem e sustentabilidade vem sendo debatida em todo o mundo. O Brasil acompanha essa tendência com um importante marco, que foi a criação da lei nº 12.305 de 2010 – A Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS). Essa política visa diminuir a geração de resíduos sólidos, além de criar a responsabilidade compartilhada que vai da indústria ao consumidor final, criando metas para o índice de reciclagem, o que coloca o Brasil em pé de igualdade com países desenvolvidos (BRASIL, 2010).

Os resíduos sólidos têm aumentado cada vez mais devido à grande quantidade de produtos embalados que são consumidos. Muitos destes resíduos são polímeros utilizados em embalagens para acondicionamento de bebidas, leites e derivados, que poderiam ser reciclados, mas que devido à separação insuficiente dos resíduos e a pouca coleta seletiva, acabam permanecendo no meio ambiente por muitos anos, provocando problemas ambientais. Dentre os resíduos temos as embalagens cartonadas do tipo longa vida (LV) que se tornaram um problema com a sua lenta decomposição, provocando a sua permanência por muito tempo nos aterros sanitários.

Atualmente usamos cada vez mais embalagens do tipo longa vida devido a sua boa capacidade de conservação de alimentos, visto que possuem várias camadas na sua composição, como papel, polietileno e alumínio. Essas diversas camadas garantem a conservação do produto e de seu sabor original, além de proteger os alimentos de agentes externos como microrganismos. Uma das grandes vantagens é o seu baixo custo, pois permite um tempo de prateleira (*shelf-life*) maior. Apesar das suas grandes vantagens, um dos principais problemas é o seu descarte, pois as embalagens não são de natureza orgânica, de modo que a sua decomposição é muito demorada, sendo o tempo de decomposição do papel de seis meses, do alumínio de 200 anos, e do polietileno de mais de 300 anos (BRASIL, 2018).

No ano de 2018 foram recicladas no Brasil apenas 29,1% das embalagens longa vida TetraPak®, sendo que esse número representa mais de 73 mil toneladas de embalagens cartonadas, onde cada tonelada de embalagens reciclada acaba por gerar 680 quilos de papel Kraft (CEMPRE, 2018). Como a separação do polietileno e do alumínio recuperados na reciclagem das embalagens LV é difícil, não sendo viável economicamente, diversas aplicações foram desenvolvidas para a mistura polietileno/alumínio.

Na Figura 1 são apresentadas algumas das aplicações das placas compósitas formadas pelo polietileno e alumínio. Estas placas podem ser utilizadas como revestimento de paredes e, com um formato ondulado, como telhas em construções residenciais. Outra possibilidade é a

aplicação em veículos de carga, como caminhões e furgões baú, com a função de proteger o interior dos mesmos, além de agir como uma barreira para o calor em função do alumínio contido na sua composição. Outra vantagem, quando comparada com tapumes de madeira, é que as placas de material compósito possibilitam uma lavagem sem reter água, melhorando assim a higiene como, por exemplo, em veículos de carga de produtos alimentícios. Ainda, como a placa sai altamente maleável da prensa, também seria possível o emprego de moldes para a obtenção de forros de caixa de roda, painéis corta fogo e tampas para forração de portamalas.

Figura 1 – Aplicações das placas compósitas produzidas a partir do polietileno e alumínio reciclados de embalagens cartonadas longa vida.



Fonte: ECO (2020).

Com esse trabalho pretende-se contribuir para o aumento da reciclagem de embalagens cartonadas longa vida através do estudo de placas desenvolvidas a partir do polietileno e alumínio reciclados. A caracterização das propriedades de dureza e resistência à tração são de extrema importância para poder determinar a aplicação do material em diversas áreas. Por exemplo, no setor automotivo as placas podem ser aplicadas como forros de portas e diversas peças, que hoje são produzidas utilizando polímeros, contribuindo assim para a rigidez do veículo e segurança dos ocupantes dos automóveis e outros veículos automotores.

1.1 OBJETIVOS

Este estudo tem como objetivo o estudo de propriedades mecânicas de placas compósitas produzidas a partir do alumínio e do polietileno reciclados de embalagens cartonadas longa vida (LV).

1.1.1 Objetivo Geral

Caracterizar as propriedades mecânicas de placas compósitas produzidas a partir de polietileno e alumínio reciclados de embalagens cartonadas longa vida (LV).

1.1.2 Objetivos Específicos

- Determinar as espessuras das placas compósitas formadas por polietileno e alumínio reciclados a partir de embalagens cartonadas;
- Caracterizar as propriedades mecânicas tensão máxima, tensão de ruptura e módulo de elasticidade dos corpos de prova produzidos a partir das placas de material reciclado;
- Determinar a dureza Shore D das placas produzidas a partir da reciclagem das embalagens cartonadas longa vida.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS NO BRASIL

Atualmente, a população mundial conta com um pouco mais de sete bilhões de seres humanos, que geram 1,4 bilhão de toneladas de resíduos sólidos anualmente. Os países mais desenvolvidos têm maior parcela na produção de resíduos sólidos, sendo que 30 países são responsáveis por metade do resíduo sólido gerado no mundo (EM DISCUSSÃO, 2014). Estudos da Organização das Nações Unidas (ONU) e do Banco Mundial alertam para que, se continuarmos mantendo o ritmo de crescimento no volume de resíduos sólidos, teremos em 10 anos a geração de 2,2 bilhões de toneladas anuais. Outro ponto importante é que 20% a 30% dos orçamentos mundiais estão atrelados à coleta e a destinação desses resíduos, sendo que apenas metade da população mundial tem acesso a coleta de resíduos sólidos, segundo a Associação Internacional de Resíduos Sólidos (ISWA, 2014).

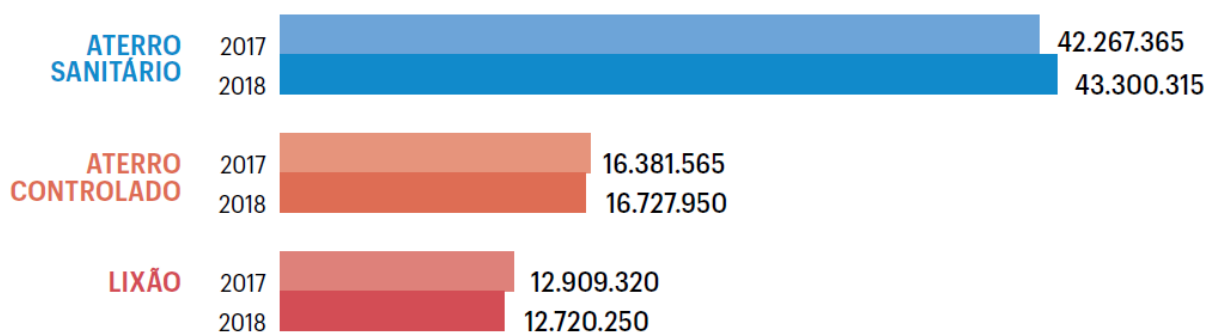
Outro ponto relevante é a questão do espaço utilizado para dispor os resíduos sólidos. Em geral, países que tem menos espaço para dispor os resíduos gerados encontraram soluções para reutilizar, reciclar ou incinerar estes materiais, como é o caso de alguns países Europeus e do Japão, onde as características demográficas acabam por evidenciar os problemas para com os resíduos gerados e seu destino; já países emergentes com uma vasta extensão territorial, como é o caso da China, Brasil e México, tendem a tratar com menos urgência a questão da destinação dos resíduos, uma vez que não encontram problemas para armazenar seus resíduos.

Nos últimos anos, o Brasil está buscando alterar a forma como trata os resíduos sólidos. Um marco importante foi a criação da lei nº 12.305 de 2010, a Política Nacional de Resíduos Sólidos. Além de criar a responsabilidade compartilhada, que vai da indústria ao consumidor final, foram estabelecidas metas para o índice de reciclagem, colocando o Brasil em pé de igualdade com países desenvolvidos (BRASIL, 2010).

Em 2018 foram geradas no Brasil 79 milhões de toneladas de resíduos sólidos urbanos, o que equivale a uma geração média de 380 kg de resíduos por pessoa naquele ano. Desse montante, 92% (72,7 milhões) foram coletados, sendo que 6,3 milhões de toneladas de resíduos não foram recolhidas junto aos locais de geração. A destinação adequada em aterros sanitários recebeu 59,5% dos resíduos sólidos urbanos coletados: 43,3 milhões de toneladas, sendo que o restante dos resíduos (40,5%) foi despejado em locais inadequados, ou seja, 29,5 milhões de toneladas de resíduos sólidos urbanos foram para lixões ou aterros controlados, que não contam com um conjunto de sistemas e medidas necessários para proteger a saúde das pessoas e o meio

ambiente contra danos e degradações (ABRELPE, 2019). A Figura 2 apresenta a destinação dos resíduos sólidos urbanos coletados no Brasil nos anos de 2017 e 2018.

Figura 2 – Disposição final dos Resíduos Sólidos Urbanos no Brasil (toneladas/ano).



Fonte: ABRELPE (2019)

A produção de materiais possui significativo impacto ambiental e a reciclagem de resíduos permite a redução no volume de extração de matérias primas, a conservação de matérias primas não renováveis, a redução do consumo de energia, a menor emissão de poluentes (como CO₂, compostos orgânicos voláteis, etc.), e a melhoria da saúde e segurança da população.

A reciclagem é um conjunto de técnicas de reaproveitamento de materiais descartados, reintroduzindo-os no ciclo produtivo. É uma das alternativas de tratamento de resíduos sólidos mais vantajosa, tanto do ponto de vista ambiental quanto do social, pois ela reduz o consumo de recursos naturais, poupa energia, economiza água, diminui o volume de resíduos sólidos gerados e ainda permite a geração de emprego e renda para milhares de pessoas (BRASIL, 2020).

A implantação de sistemas para a coleta seletiva de lixo, começando nas residências, é uma das soluções para amenizar o problema da destinação dos resíduos sólidos urbanos gerados diariamente nas cidades. A coleta seletiva possibilita a diminuição da quantidade de resíduos enviados para aterros sanitários, o desenvolvimento das indústrias de reciclagem, a diminuição da extração de recursos naturais, a redução do consumo de energia e da poluição e, ainda, contribui para a limpeza da cidade, para a conscientização dos cidadãos a respeito do reaproveitamento de materiais de “segunda mão” e a possibilidade de geração de empregos (TETRAPAK, 2004).

As embalagens longa vida cartonadas (LV) tiveram um aumento significativo na quantidade reciclada, sendo que se em 1999 apenas 10% foram recicladas, em 2018 o número

subiu para 29,1%, o que demonstra que esse mercado apresenta um grande potencial (BRASIL, 2017; CEMPRE 2020).

As embalagens LV são atualmente muito consumidas devido às suas propriedades de conservação dos alimentos, considerando-se, assim, que o consumo é proporcional ao número de resíduos dispensados pela sociedade. Trata-se de um produto 100% reciclável, uma vez que o papel é reaproveitado pelas indústrias de papel e celulose, o plástico pode ser reciclado como material de uso domiciliar, na confecção de vassouras, por exemplo; e o alumínio, por sua vez, como alumínio polido. Também é possível a reciclagem do polietileno e alumínio juntos, o que dá origem a placas compósitas.

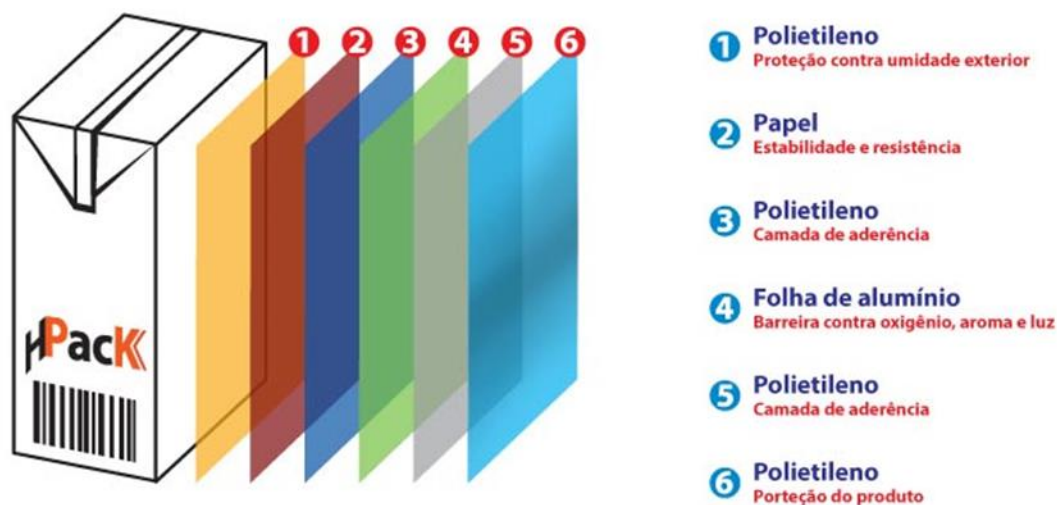
2.2 EMBALAGENS CARTONADAS

As primeiras embalagens cartonadas foram desenvolvidas por Ruben Rausing, em 1947. Elas eram constituídas de papel e plástico com selamento a vácuo. Foi na década de 1950 que a embalagem cartonada passou a ganhar o delineamento contemporâneo, em forma de paralelepípedo, com o envasamento asséptico aprimorando-se junto com as novas tecnologias (NASCIMENTO et al., 2011; SOUZA, 2011)

As embalagens longa vida, também chamadas de cartonadas, assépticas ou multicamadas, combinam diferentes materiais, conseguindo propriedades que permitem o armazenamento e conservação de diversos tipos de alimentos, permitindo aumentar o prazo de validade dos produtos armazenados. Assim, essas embalagens conseguem armazenar líquidos de diferentes viscosidades, tais como leites, sucos, molhos, dentre outros (ABREU, 2017; SOUZA, 2011). Em 2019 foram produzidas pela empresa Tetrapak mais de 190 bilhões de embalagens em mais de 160 países, enquanto a empresa SIG Combibloc produziu 38 bilhões de embalagens cartonadas em 68 países (SIG, 2020; TETRAPAK, 2020).

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 (ABREU, 2017; ALVARENGA, 2013). A Figura 3 apresenta as diversas camadas da embalagem cartonada.

Figura 3 – Camadas de materiais formadoras de uma embalagem cartonada.



Fonte: Partners (2018)

As embalagens longa vida usadas no processo de envase de sucos e leites são compostas de 75% de papel, 5% de alumínio e 20% de polietileno. Estes materiais são adotados para melhorar a conservação dos produtos. O papel é responsável pela estabilidade e resistência da embalagem. O polietileno de baixa densidade (PEBD) está presente em quatro das seis camadas das embalagens LV. Este polímero age como uma resina ligante entre as camadas, sendo responsável pela proteção contra a umidade externa. O alumínio está presente em apenas uma camada da embalagem, com espessura acima de 18 μm . Esta camada de metal tem a função de evitar o contato do alimento acondicionado com agentes indesejáveis ao criar uma barreira contra a luz e o oxigênio, conseguindo assim conservar o produto por um longo período de tempo, facilitando a distribuição e o armazenamento do mesmo (ABREU, 2017; BORGES, 2007; PAK, 2018).

A elaboração da embalagem Tetra Pak é dividida em três estágios fundamentais: impressão, laminação e o corte. Na primeira etapa ocorre a impressão, onde é aplicada a camada de tinta que irá servir de rótulo do produto. Após impresso, o papel passa pela laminação para serem adicionados o polietileno e o alumínio. Na última etapa é realizado o corte e bobinamento. Após o processo, o produto é enviado ao cliente para o envasamento do produto que irá ser comercializado.

A fim de conferir resistência à compressão e estabilizar a embalagem controla-se a propriedade de rigidez. Essa rigidez também ajuda no processo de produção, onde será necessário o dobramento e também confere forma a substâncias líquidas, que serão armazenadas, como, por exemplo, leite, sucos, etc. (NEVES, 2000).

Uma das principais vantagens das embalagens LV está associada à preservação dos alimentos, aumentando o seu *shelf life*. As embalagens com várias lâminas de papel, polietileno e alumínio permite barrar oxigênio, luz, microrganismos, entre outros, conferindo maior proteção ao alimento envasado. Essa conservação é feita sem adição de conservantes, sendo admissível armazenar o material por longo tempo e ainda obtê-lo fresco. Ainda com a maior duração do produto é possível manter o seu preço estável ao longo do tempo (ABREU, 2017; SOUZA, 2011).

Apesar de oferecer algumas vantagens, como o aumento da eficiência na preservação de produtos, resistência mecânica, densidade, redução de gastos em transporte e em energia, as embalagens LV também apresentam um contraponto negativo, que é a dificuldade para o encaminhamento à reciclagem, justamente devido às combinações dos elementos que os estruturam - o papel, o plástico e o alumínio. Quando dispostos na natureza, o tempo de decomposição média do papel está entre dois e cinco meses, do alumínio 100 a 500 anos e do polietileno de 100 a 300 anos (SOUZA, 2011).

Segundo CEMPRE (2020), em 2018 foram recicladas no Brasil mais de 73 mil toneladas de embalagens LV, totalizando 29,1% do volume de embalagens produzidas. Por ser uma embalagem extremamente leve, seu peso não é tão expressivo no lixo urbano. Nos programas de Coleta Seletiva, o peso da embalagem longa vida é de quase 3%, segundo a pesquisa Ciclosoft de 2012. Estudos da Universidade de São Paulo (2000) atestam que após 6 meses, 49% da embalagem se decompõe totalmente quando depositada em aterros sanitários adequados.

A empresa Tetra Pak, preocupada com o impacto ambiental de suas embalagens cartonadas, desenvolveu duas formas de reciclar a embalagem do tipo longa vida. A primeira consiste na separação do papel, o qual é reutilizado, sobrando assim o alumínio e o plástico, que são usados como matéria-prima para a produção de novos produtos. O segundo método consiste em reutilizar as embalagens inteiras para a geração de novos produtos (PAK, 2010).

O processo de reciclagem inicia-se com a alimentação das embalagens no hidrapulper, equipamento utilizado para a mistura e trituração de grandes volumes, onde as fibras são agitadas apenas com água. O papel é hidratado, separando-se das camadas de plástico e alumínio. Após a separação, estas fibras celulósicas seguem para a máquina de papel. O produto final é o papel reciclado, que pode ser usado para confecção de caixas de papelão. Cada tonelada de embalagem cartonada reciclada gera, aproximadamente, 680 quilos de papel kraft (ABREU, 2017; CEMPRE, 2020).

O material restante, formado por plástico e alumínio pode ser utilizado de três maneiras (CEMPRE, 2020):

- 1) Fabricação de placas e telhas: o polietileno e o alumínio são triturados e depois prensados a altas temperaturas, produzindo chapas semelhantes à madeira, ideais para a produção de móveis e divisórias. Essas chapas podem ser transformadas também em telhas utilizadas na construção civil.
- 2) Produção de “pellets”: o composto de plástico com alumínio pode ser encaminhado para as indústrias de plástico, onde são reciclados por meio de um processo de extrusão para produção de “pellets”. Esses “pellets” são pequenos grãos de plástico e alumínio que podem ser utilizados como matéria prima nos processos de fabricação de peças por injeção, rotomoldagem ou sopro. Os produtos finais são canetas, banquetas, vassouras, coletores e outros.
- 3) Reciclagem via Plasma: esta tecnologia permite a completa separação das camadas de plástico e alumínio. O sistema usa energia elétrica para produzir um jato de plasma a 15000 °C para aquecer a mistura de plástico e alumínio. Com o processo, o plástico é transformado em parafina e o alumínio totalmente recuperado em forma de lingotes de alta pureza. Esses lingotes são transformados em novas folhas de alumínio usadas na fabricação de novas embalagens LV, fechando assim o ciclo de reciclagem do material. A parafina é vendida para a indústria petroquímica nacional.

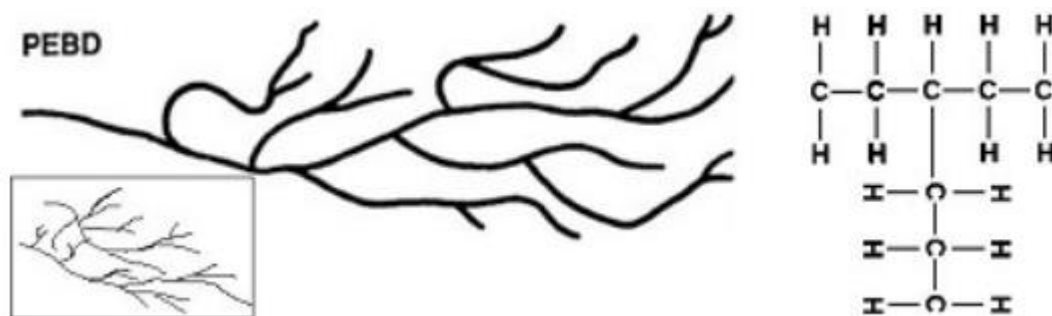
2.3 POLIETILENO

O polietileno de baixa densidade (PEBD) é uma resina plástica com baixa condutividade térmica e elétrica, além de ser atóxica, o que justifica o seu uso em embalagens cartonadas.

As resinas de PEBD são obtidas de duas formas. A primeira é através da nafta, que vem da destilação fracionada do petróleo. A segunda forma é através do etanol produzido a partir da cana de açúcar. É conhecido como polímero verde, por ter fonte de produção renovável e um número menor de emissão de CO₂ durante a sua produção comparado com o polímero de origem fóssil.

O PEBD apresenta a estrutura cristalina mais simples entre os polímeros, sendo ela em zig-zag, a qual é construída pela repetição da estrutura (CH₂) e finalizada com um metil (CH₃), como apresentado na Figura 4.

Figura 4 – Representação esquemática da cadeia do polietileno de baixa densidade (PEBD).



Fonte: RODA (2010)

Durante o processo de produção do PEBD há o emprego de pressões elevadas que variam de 101,32 a 303,97 MPa. Já a sua temperatura varia entre 100 e 300 °C, pois ao passar desse ponto é comum a degradação do polímero. Em geral costuma-se usar o oxigênio para iniciar a reação, que por sua vez causa elevadas temperaturas durante o processo (COUTINHO; MELLO; MARIA, 2002).

A combinação de elevadas pressões e uma reação exotérmica causam o surgimento de grandes ramificações, as quais tem grande importância nas propriedades mecânicas do polímero PEBD. Uma característica desse tipo de ligação é que suas ligações são tão longas quanto as da cadeia principal e tem influência acentuada sobre a viscosidade do polímero em solução quando comparado com um polímero de cadeia linear, em que ambos apresentam a mesma massa molecular. Essas ramificações são responsáveis por determinar a temperatura de transição vítrea e a cristalinidade do polímero.

Quanto à estrutura do polímero, o PEBD possui cristalitos menores, quando comparado com o polietileno linear, o que resulta em uma menor cristalinidade, bem como uma maior desordem cristalina quando comparado com um polímero de cadeia linear, isso é devido ao fato de que as grandes ramificações não são possíveis de se acomodar na rede cristalina.

O polietileno de baixa densidade (PEBD) é relativamente cristalino (50-60%) e a sua fusão ocorre na faixa de temperatura entre 110 e 115 °C. Dentre as propriedades mecânicas que se encontram no PEBD destacam-se: é um material com alta resistência ao impacto, alta flexibilidade e boa tenacidade; quando exposto a água em temperatura ambiente apresenta alta resistência e em altas temperaturas pode apresentar uma oxidação lenta. A Tabela 1 apresenta o intervalo das principais propriedades do PEBD.

Tabela 1 – Propriedades do polietileno de baixa densidade (PEBD)

Propriedades	Método ASTM	PEBD
Densidade, g cm ⁻³	D792	0,912 – 0,925
Temperatura de fusão cristalina, °C	D792	102 – 112
Índice de refração, n_D	D542	1,51 – 1,52
Tração no escoamento, MPa	D638	6,2 – 11,5
Alongamento no escoamento, %	D638	100 – 800
Resistência a tração, MPa	D638	6,9 – 16
Alongamento máximo, %	D638	100 – 800
Módulo de elasticidade, MPa	D638	102 – 240
Dureza, Shore D	D676	40 – 50

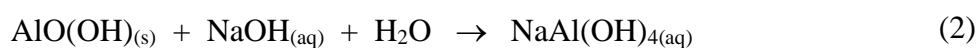
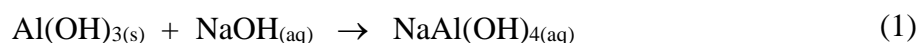
Fonte: COUTINHO; MELLO; MARIA (2003).

O PEBD é muito utilizado em diversas aplicações, como em embalagens agrícolas, farmacêuticas e hospitalares. Por ser um material atóxico, é muito usado na confecção de brinquedos e embalagens alimentícias, garantindo assim que esses objetos não causem danos à saúde das pessoas. O setor de materiais elétricos tem usado este polímero como isolante em fios condutores. Segundo ABIPLAST (2017), o polietileno de baixa densidade representa 7,8% dos plásticos transformados no Brasil, sendo que, de forma geral, 31,1% dos plásticos transformados no Brasil possuem um ciclo de vida de apenas um ano.

2.4 ALUMÍNIO

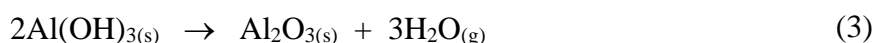
O alumínio é obtido a partir da bauxita. É um produto que necessita uma grande quantidade de energia para a sua produção. O principal processo usado para a obtenção do alumínio é o processo Bayer, no qual ocorre o refino da bauxita. Inicialmente a bauxita é moída em pedaços menores, os quais são encaminhados para o digestor, onde posteriormente é adicionada soda cáustica (NaOH) sob pressão e temperatura controlada. Dependendo das propriedades da bauxita, a temperatura pode variar de 200 a 240 °C e a pressão é estimada em 30 atm. Nessas condições, a grande maioria das espécies é dissolvida, gerando uma substância de coloração verde (HIND; BHARGAVA; GROCOTT, 1998).

As principais reações que ocorrem neste processo estão apresentadas nas reações químicas 1 e 2.



O processo de clarificação é uma etapa muito importante do processo, pois nela se faz a separação das fases sólidas e líquidas. Comumente é utilizada a técnica de espessamento sucessivo de uma etapa de filtração. Durante o espessamento ocorre a decantação, onde os resíduos provenientes da digestão passam pelos espessadores/lavadores com o objetivo de adensar o resíduo, causando assim um aumento da fase sólida, possibilitando uma maior recuperação da quantidade de NaOH do processo, além de criar um transbordo para a etapa de filtração. Nesta etapa é comum o acréscimo de polímeros, como a poliacrilamida ou os hidroxamatos, que auxiliam na floculação nos espessadores (HIND; BHARGAVA; GROCOTT, 1998).

Logo após ocorre a precipitação do hidróxido de alumínio durante o resfriamento do líquido verde. Com esse resfriamento completo é realizada a sementeira, onde são introduzidas pequenas quantidades de cristais de alumina com o intuito de estimular a precipitação, em um sentido contrário a digestão. Após a calcinação do material precipitado, é obtida a alumina pura (Al_2O_3) (reação 3), que depois será usado para a obtenção do alumínio.



Devido ao alumínio possuir uma elevada reatividade química para com outros elementos, ele está presente em várias ligas, sendo largamente utilizado no setor de ferramentas. Também possui uma grande aplicação em estruturas, uma vez que este metal possui densidade inferior à dos aços, o que se traduz em um alívio de peso.

O alumínio pode ser utilizado também na construção civil, onde é usado como meio estrutural de portas, janelas, divisórias e portões, entre diversas aplicações. No setor elétrico é utilizado de forma preferencial nas redes de alta tensão, visto que a condutividade do alumínio é cerca de 40% a do cobre. Está ainda presente em embalagens cartonadas do tipo longa vida, compondo 5% do material utilizado na sua produção.

A indústria do alumínio vem apresentando melhorias contínuas no processo de produção, além de melhorar a sua eficiência devido a otimização dos processos primários e secundários. O alumínio primário usa em média 113 GJ por tonelada de energia no processo de produção, enquanto o alumínio no setor secundário oriundo de reciclagem consome 13,6 GJ por tonelada, o que justifica a reciclagem do mesmo. Em termos de emissão de poluentes, a produção de alumínio primário necessita de 45 kWh de energia, emitindo 12 kg de CO_2 para cada quilograma produzido, enquanto o alumínio secundário consome 2,8 kWh de energia e

emite 0,6 kg de CO₂ para cada quilograma de alumínio recuperado (KDHINDAW; GOWRAWARAMSLADITYA; ANDANIMESHMANDAL, 2019).

A Tabela 2 apresenta as principais propriedades do alumínio.

Tabela 2 – Propriedades do alumínio

Propriedades	
Densidade (g cm ⁻³)	2,70
Temperatura de fusão (°C)	660
Módulo de elasticidade (GPa)	70,0
Limite de resistência à tração (MPa)	48,0
Limite de escoamento (MPa)	12,7
Dureza Brinell (HB)	20 a 26

Fonte: Adaptado de ABAL (2019) e SHOCKMETAIS (2019).

2.5 MATERIAIS COMPÓSITOS

Motivado pela necessidade de otimizar processos e equipamentos e ao mesmo tempo reduzir o impacto ambiental, cada vez mais os engenheiros vem adotando o uso de materiais compósitos. Apesar de seu estudo ainda se encontrar em grande ascendência, já é possível combinar diversos materiais, dando origem aos materiais compósitos.

Os materiais compostos ou compósitos podem ser definidos como a combinação de dois ou mais materiais em sua composição. É um material multifásico, onde há a combinação de suas propriedades com o objetivo de serem obtidas propriedades otimizadas no material formado (CALLISTER, 2012).

Os compósitos podem ter dois tipos de origem em sua essência. O primeiro tipo são os naturais, onde o material composto se forma naturalmente sem a intervenção do homem. Um exemplo é a madeira, onde as fibras de celulose são envolvidas e mantidas por um material firme chamado lignina. A segunda forma é pela intervenção de engenheiros e cientistas, na qual se faz a união de dois ou mais materiais, podendo eles serem metais, polímeros e cerâmicas. Em ambos os casos, para ser considerado um compósito, as fases constituintes devem ser quimicamente diferentes.

Geralmente materiais compósitos costumam apresentar duas fases. A primeira fase é a matriz, que é contínua e envolve a outra fase, chamada de dispersa. A Figura 5 apresenta a classificação dos materiais compósitos.

Figura 5 – Classificação dos materiais compósitos.



Fonte: CALLISTER (2012)

O compósito reforçado com partículas conta com uma matriz que envolve as partículas, chamadas de dispersas. Nesse tipo de arranjo tem-se que as partículas causam um aumento da resistência através da restrição do movimento da matriz em sua vizinhança pela transferência da tensão às partículas. O segundo compósito é fruto do reforço utilizando fibras. Essa solução em geral é muito desejada, uma vez que se consegue combinar o aumento da rigidez com um peso menor. Esse segundo compósito se diferencia do reforço por partículas pela interação, uma vez que a interação da matriz ocorre com a fibra. E por último temos o compósito estrutural, o qual é fruto da combinação de materiais homogêneos e compósitos aliados a geometria, que busca elevar a sua dureza. Painéis laminados e painéis sanduíche são exemplos de compósitos estruturais (CALLISTER, 2012).

A construção civil está adotando o uso de materiais compósitos com a intenção de otimizar as propriedades desejadas de uma peça para uma certa aplicação como, por exemplo, otimizar a rigidez estrutural. Um exemplo disso foi a aplicação de fibra de carbono no lugar do ferro na reforma do Maracanã, no Rio de Janeiro, utilizando-se assim materiais compósitos na reforma do estádio. Outro ponto interessante é que a utilização da fibra de carbono causou uma redução do tempo de trabalho entre 60% a 70% quando comparado com o ferro, otimizando assim o tempo da obra, uma vez que a fibra de carbono está pronta para ser aplicada, diferente do ferro que necessita de amarrações (REVISTAOE, 2018).

Outro setor que vem aumentando o consumo de materiais compósitos é a indústria automotiva, aonde a substituição dos materiais convencionais vem melhorando vários parâmetros dos veículos, como é o caso da diminuição do peso, que tem relação com o consumo

do veículo. Outro ponto interessante de se destacar é o aumento da segurança dos ocupantes, tendo-se também uma diminuição dos custos de produção (GUTIÉRREZ; RUBIO; FARIA; DAVIM, 2014). Outras vantagens são a boa capacidade de absorção de energia e baixa densidade dos compósitos.

De forma geral, os materiais compósitos podem ser encontrados em vários setores, como alimentício, aéreo, de serviços, etc., sendo que o compósito, em sua grande maioria, visa otimizar alguma propriedade da aplicação, seja mecânica, química, ou simplesmente otimizar o processo produtivo.

2.6 PROCESSO DE PRODUÇÃO DOS COMPÓSITOS POLIETILENO/ALUMÍNIO

Para um maior entendimento do processo de produção de placas providas de embalagens cartonadas foi realizado o acompanhamento do processo produtivo da empresa Mega Telhas Ecológicas, que está situada na cidade de Nova Esperança, norte do Paraná. A empresa trabalha exclusivamente com embalagens TetraPak.

A matéria prima, coletada por catadores de materiais recicláveis em todo o Brasil, é encaminhada para cooperativas de catadores, onde ocorre a separação das embalagens LV de outras embalagens e resíduos sólidos. As embalagens LV são encaminhadas a empresas de celulose parceiras da TetraPak, como a Revita, situada em Telêmaco Borba/PR. Estas empresas são responsáveis pela separação da celulose das embalagens cartonadas. O papel recuperado retorna para a indústria papelreira para ser reaproveitado. A Figura 6 apresenta a celulose recuperada no processo.

Figura 6 – Papelão provindo de embalagens longa vida.



Fonte: REVITA (2019)

A matéria prima resultante do processo de separação da celulose ainda apresenta aproximadamente 3% de papelão em sua composição, sendo o restante polietileno de baixa densidade e alumínio. Esse material residual requer um processamento para a retirada do restante do papelão presente e a sua adequação para o processo produtivo de reaproveitamento do PEBD e do alumínio. Este resíduo é compactado para facilitar o seu transporte até a empresa (Figura 7).

Figura 7 – Recebimento da matéria prima.



Fonte: Autor (2018)

Após o seu recebimento, na primeira etapa do processo, a matéria prima é colocada em um reservatório cilíndrico, conhecido como Tromer, onde é realizada a descompactação do material. Posteriormente, a matéria prima é passada por um ventilador, onde ocorre a retirada das tampas das embalagens e possíveis impurezas que tenham vindo junto com o material, como por exemplo, pedras, materiais metálicos, etc. Após a conclusão dessa etapa, o material é encaminhado para o ventilador separador para a retirada do restante do papelão presente, uma vez que o papel interfere na qualidade do produto e na durabilidade do mesmo, essa etapa também ajuda a retirar a umidade do material. A próxima etapa é conhecida como picador, onde o material é cortado em formato uniforme para garantir a uniformidade do material no molde.

O material no tamanho correto é colocado no molde, sendo a quantidade depositada dependente da espessura da chapa a ser produzida. Após o preenchimento do molde, o mesmo é levado para a prensa elétrica para a etapa de cozimento, a qual dura 30 minutos a uma temperatura de 160 °C. Quando retirado da prensa, a placa está altamente maleável devido a

sua temperatura, de tal forma que se pode colocá-la em uma ondulateira para obter uma telha, ou então deixá-la descansar em uma superfície plana para se obter uma placa plana.

Após o resfriamento, é feita uma inspeção visual das placas ou telhas para garantir que não exista nenhum corpo estranho dentro do material. A última etapa consiste em retirar as rebarbas das chapas e telhas para garantir as dimensões adequadas do produto (Figura 8).

Figura 8 – Aparador de Rebarbas.



Fonte: Autor (2018)

3 MATERIAL E MÉTODOS

Este trabalho teve por objetivo determinar as propriedades mecânicas tensão máxima, tensão de ruptura, módulo de elasticidade e dureza Shore D de um material compósito formado por polietileno e alumínio produzido a partir do polímero e do metal resultantes da reciclagem de embalagens cartonadas do tipo longa vida (LV).

3.1 ELABORAÇÃO DAS PLACAS DE MATERIAL RECICLADO

Placas compósitas foram formadas pela mistura de polietileno e alumínio provindos da reciclagem das embalagens cartonadas longa vida, sendo a composição das placas 84% do plástico polietileno e 16% do metal. As placas foram produzidas pela empresa Mega Telhas Ecológicas Ltda., situada na cidade de Nova Esperança, Paraná. A empresa trabalha exclusivamente com material reciclado de embalagens TetraPak®.

Para verificar as propriedades mecânicas das placas, foram analisadas quatro placas contendo espessuras de 4, 7 e 12 mm, e uma quarta placa com espessura de 10 mm que, além da matéria prima provinda da reciclagem, tem em sua composição o pó oriundo do corte das rebarbas do material.

As placas foram produzidas em uma prensa com 245 cm de comprimento por 96 cm de largura utilizando uma pressão de 150 kg m^{-2} durante 60 minutos a uma temperatura de $160 \text{ }^{\circ}\text{C}$. A Figura 9 apresenta uma prensa semelhante à usada no processo.

Figura 9 – Modelo de prensa utilizado para a produção das placas compósitas.



Fonte: INCOMESP (2018)

A partir das diferentes placas, foram produzidos corpos de prova (CPs) para a realização dos ensaios segundo a norma ASTM D3039 (2002) que regulamenta os testes de determinação da resistência à tração em materiais compósitos. A norma determina um número mínimo de cinco (5) CPs para o ensaio de resistência à tração.

Referente a geometria dos corpos de prova, a norma ASTM D3039 não determina um tamanho específico, mas sugere que sejam fabricados CPs com 25 mm de largura por 250 mm de comprimento com seção constante e retangular. Os CPs foram cortados com uma serra circular com um disco de corte de madeira para não causar aquecimento nas bordas. A Figura 10 apresenta a marcação realizada em uma das placas compósitas PEBD/alumínio para a obtenção dos CPs.

A determinação da espessura das placas compósitas foi realizada nos corpos de prova obtidos seguindo a norma ASTM D3039 (2002). Foram produzidos oito CPs das placas com espessura 4, 7, 10 e 12 mm, resultando em um total de 32 corpos de prova. A espessura de cada corpo de prova foi determinada em três pontos diferentes utilizando um paquímetro Vander de 150 mm com uma resolução de 0,05 mm. Os valores obtidos para as espessuras de cada CP, bem como a sua média, estão apresentados no Apêndice A.

Figura 10 – Marcação dos corpos de prova.



Fonte: (Autor, 2019)

3.2 ENSAIO MECÂNICO DE TRAÇÃO

O ensaio de tração foi realizado no Laboratório de Materiais da Universidade Federal de Santa Catarina, Campus Blumenau, utilizando uma máquina de ensaio Universal Instron modelo EMIC 23-100 com célula de carga de 5 kN (Figura 11).

Figura 11 – Máquina Universal de Ensaios.



Fonte: Autor (2019).

Os ensaios foram conduzidos com base na Norma ASTM D3039, sendo que essa norma tem o intuito de regulamentar o ensaio mecânico de tração em materiais compósitos. Primeiramente, no teste de resistência à tração, fixa-se o corpo de prova na máquina por suas extremidades, de tal forma que ela consiga aplicar-lhe uma força axial a fim de aumentar o seu comprimento até o seu rompimento, determinando sua resistência à tração, bem como sua elongação. Dessa forma, como as garras do equipamento possuem 19 mm cada lado, o comprimento útil da amostra, descontando as garras, foi de 212 mm.

Com o intuito de caracterizar as propriedades mecânicas de tração do material em função da sua espessura, foram realizados os ensaios de tração em quatro grupos, sendo as seguintes espessuras: 4, 7, 10 e 12 mm. Cabe lembrar que o grupo de 10 mm apresenta em sua composição materiais provindos da fase de controle dimensional das chapas (rebarbas), possuindo assim grãos com tamanho menor.

3.3 DETERMINAÇÃO DA DUREZA DOS CORPOS DE PROVA

Para a obtenção da dureza foi utilizado um durômetro Shore D, o qual apresenta uma escala de 0 a 100 HD com uma resolução de 0,5 HD. As medidas foram realizadas na UFSC – Campus Joinville. O equipamento utilizado é apresentado na Figura 12.

Figura 12 – Equipamento para medição da dureza Shore D.



Fonte: Autor (2019).

Uma vez que se trata de um material compósito, o uso do durômetro Shore D consiste em aplicar uma penetração no material, sendo que a partir da leitura fornecida pelo equipamento temos o valor de dureza. O processo de medição foi conduzido em uma parte do material com superfície lisa e plana, não havendo materiais estranhos na superfície para se evitar distorções das medidas de dureza.

3.4 TRATAMENTO DOS DADOS

No tratamento dos dados foi utilizado o software Excel, onde para a análise da estatística descritiva foram realizados os cálculos de média e desvio padrão, bem como a análise de variância ANOVA fator único com o intuito de verificar a igualdade das médias entre os grupos em função da alteração das espessuras das placas, sendo realizada a representação gráfica do intervalo de confiança com um nível de significância de 5%. Para uma melhor visualização foi realizado a representação dos dados de forma tabular e gráfica, (MONTGOMERY; RUNGER, 2009).

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Este capítulo tem a finalidade de apresentar os resultados obtidos a partir dos ensaios, sendo eles o ensaio mecânico de tração e dureza Shore D das placas compósitas formadas a partir dos materiais reciclados das embalagens cartonadas. Para uma análise estatística dos resultados foi utilizada a análise de variância (ANOVA).

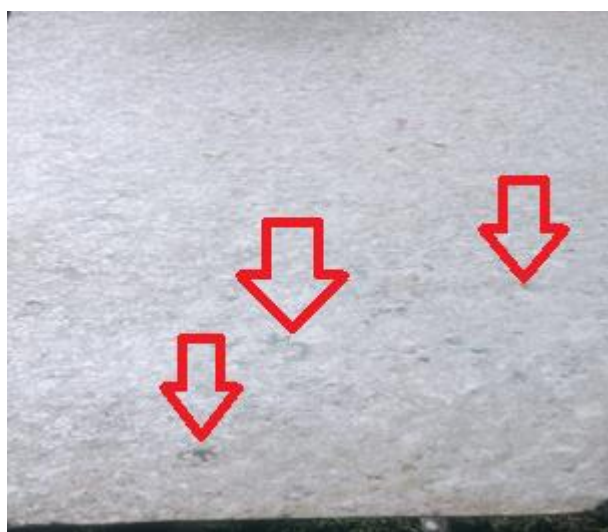
5.1 PRODUÇÃO DO COMPÓSITO POLIETILENO/ALUMÍNIO

As placas de compósito foram produzidas utilizando polietileno como matriz e alumínio como reforço. Ambos os materiais foram obtidos a partir da reciclagem de caixas cartonadas tipo longa vida TetraPack®.

As placas do material compósito são formadas pela união em prensa aquecida de uma mistura de polietileno de baixa densidade e alumínio. A temperatura utilizada de 160 °C provoca a mistura do polietileno com o alumínio, tornando este material fluido. Ao resfriar, o polímero incorpora em seu interior o alumínio.

As matérias primas são misturadas na proporção em massa de 84% de polietileno e 16% de alumínio, sendo que em cada gabarito é disposta uma quantidade em massa referente a espessura da chapa. Para a formação das chapas de 4, 7, 10 e 12 mm são utilizados 10, 16, 23 e 28 kg do material, respectivamente. A Figura 13 apresenta uma imagem da placa compósita formada. Na imagem é possível perceber as diferentes regiões devido à presença de polietileno e de alumínio

Figura 13 – Placa compósita polietileno e alumínio. As setas indicam a presença do alumínio.



Fonte: Autor (2020).

As placas foram produzidas com valores nominais de espessura de 4, 7 e 12 mm, e uma placa com espessura nominal de 10 mm a partir do pó resultante da retirada das rebarbas do processo. Esta última placa é composta por 50% da matéria prima reciclada (polietileno de baixa densidade e alumínio, na proporção de 84%/16% (m/m)) e 50% de rebarbas do processo na forma de pó. Na prática, as placas apresentam uma variação de espessura devido ao processo de enchimento manual do gabarito (Figura 14) utilizado na prensa aquecida para a formação do material compósito.

Figura 14 – Gabarito preenchido com polietileno e alumínio recuperados de embalagens longa vida cartonadas.



Fonte: Autor (2020).

Como não é possível garantir uma boa dispersão do alumínio no polietileno, pois a mistura é realizada manualmente, e nem controlar a umidade da matéria prima, pois não é realizada uma secagem do material que é recebido das empresas de reciclagem de materiais descartados, a espessura das placas pode sofrer variação. A Tabela 3 apresenta os valores para a espessura dos CPs produzidos a partir das placas do material compósito contendo as dimensões de 245 x 96 cm e espessuras nominais de 4, 7, 12 e 10 mm. A Tabela 4 apresenta as espessuras médias de cada grupo e as espessuras nominais das placas compósitas produzidas. Estes valores foram obtidos a partir dos resultados apresentados no Apêndice A.

Tabela 3 – Valores calculados para a espessura média em três pontos dos corpos de prova para os Grupos A a D retirados das placas compósitas

CP	Grupo A [mm]	Grupo B [mm]	Grupo C [mm]	Grupo D [mm]
1	4,43	7,25	12,04	9,10
2	3,86	7,67	11,87	9,38
3	3,78	7,04	11,60	9,52
4	3,85	7,13	11,85	9,56
5	3,70	7,28	11,92	9,59
6	3,89	7,06	11,96	9,68
7	3,55	7,19	12,11	9,36
8	4,02	7,33	12,16	9,69
Média	3,89	7,24	11,94	9,49
Desvio padrão	0,26	0,20	0,18	0,20

Fonte: Autor (2020).

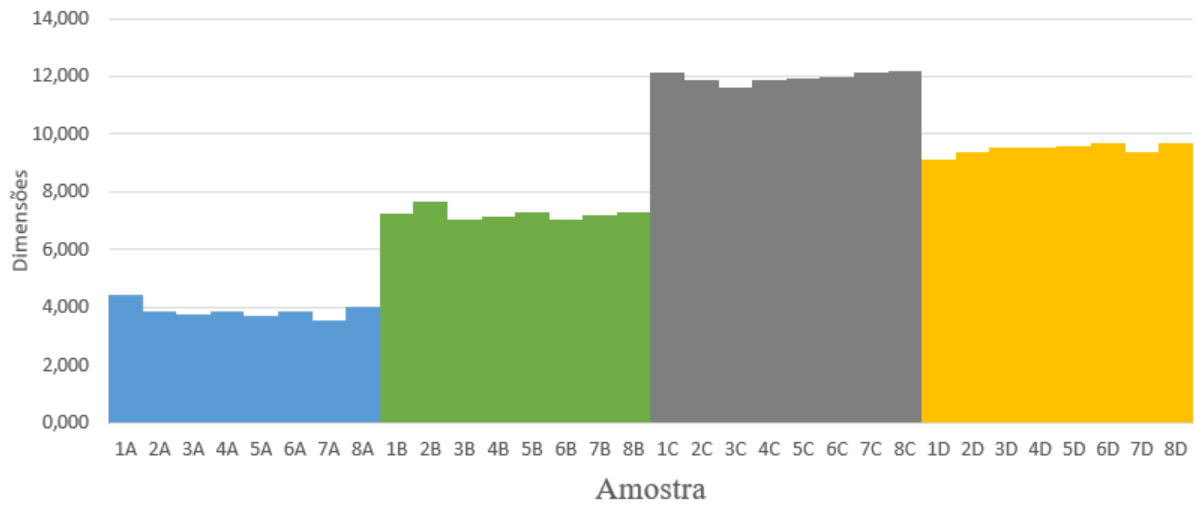
Tabela 4 – Espessura média dos corpos de prova retirados das placas compósitas

Grupo	Espessura nominal (mm)	Espessura média medida (mm)	Erro percentual (%)
A	4,00	3,89	2,85
B	7,00	7,24	3,49
C	12,00	11,94	0,39
D	10,00	9,49	5,14

Fonte: Autor (2020).

A análise da Tabela 3 e da Tabela 4 demonstra que o Grupo C apresentou o menor valor para o desvio padrão, com 0,18 mm. Já o Grupo B com 0,20 mm apresentou um valor igual ao grupo D, também com 0,20 mm. Por último tem-se o Grupo A com 0,26 mm, que foi o que apresentou o maior valor para o desvio padrão. Ao comparar a espessura nominal com a espessura média encontrada nas amostras percebe-se uma diferença nos valores. Isso pode ser decorrente da compactação do material, bem como devido aos parâmetros do processo, como tempo e temperatura. O Grupo B foi o único em que a espessura média foi maior, ficando 0,24 mm acima da espessura nominal. Os Grupos A e C apresentaram menos 0,11 e menos 0,06 mm, respectivamente, de diferença para os valores nominais. O Grupo D apresentou valor abaixo do nominal, sendo a diferença de espessura de 0,51 mm valor muito superior a diferença encontrada para os Grupos A a C. A Figura 15 apresenta uma comparação entre os valores medidos para a espessura das placas dos Grupos A a D.

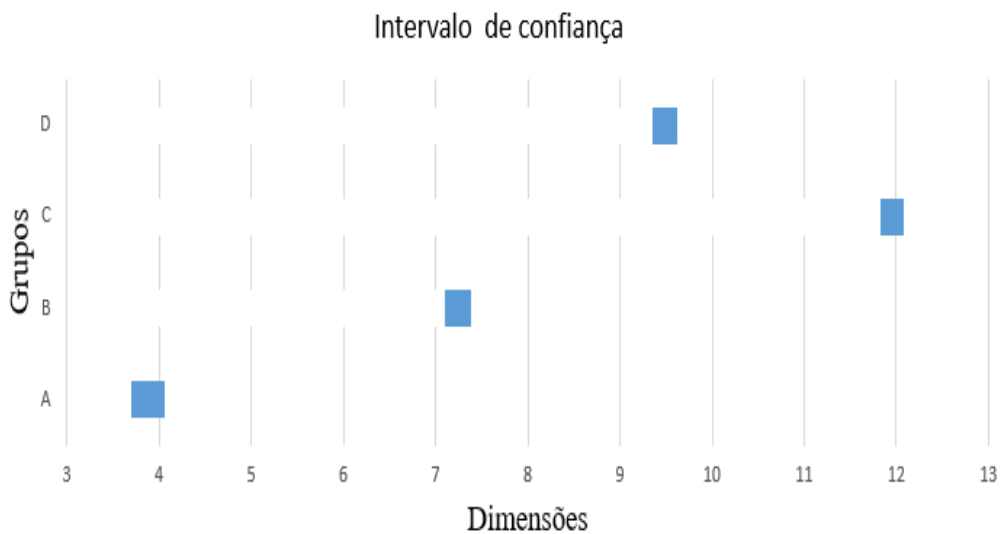
Figura 15 – Valores medidos para a espessura das placas compósitas para os Grupos A, B, C e D (4, 7, 12 e 10 mm, respectivamente).



Fonte: Autor (2020).

Com a intuito de investigar possíveis variações foi conduzida uma análise estatística utilizando a metodologia ANOVA, considerando um nível de significância de 5% para as espessuras. Pelo resultado da ANOVA, rejeita a hipótese nula (H_0), aceitando a Hipótese (H_1), ou seja, houve diferença significativa entre as médias das espessuras em pelo menos um dos grupos, com uma probabilidade de significância de $4,8 \times 10^{-31}\%$. A Figura 16 apresenta os intervalos de confiança da ANOVA para as espessuras.

Figura 16 – Análise estatística ANOVA para a espessura das placas compósitas.



Fonte: Autor (2020).

Analisando o intervalo de confiança é possível perceber que não se pode afirmar que a variação das espessuras é igual. Este resultado acaba por confirmar a análise quanto às médias dos grupos, com os valores para os Grupos A, B, C e D de, respectivamente, 3,89 mm, 7,24 mm, 11,94 mm e 9,49 mm. Outro ponto analisado foi o coeficiente de variação, no qual os Grupos A, B, C e D apresentaram valores 6,72 %, 2,75%, 1,57% e 2,05%, respectivamente. Como os valores são inferiores a 20%, indicam uma homogeneidade nas amostras.

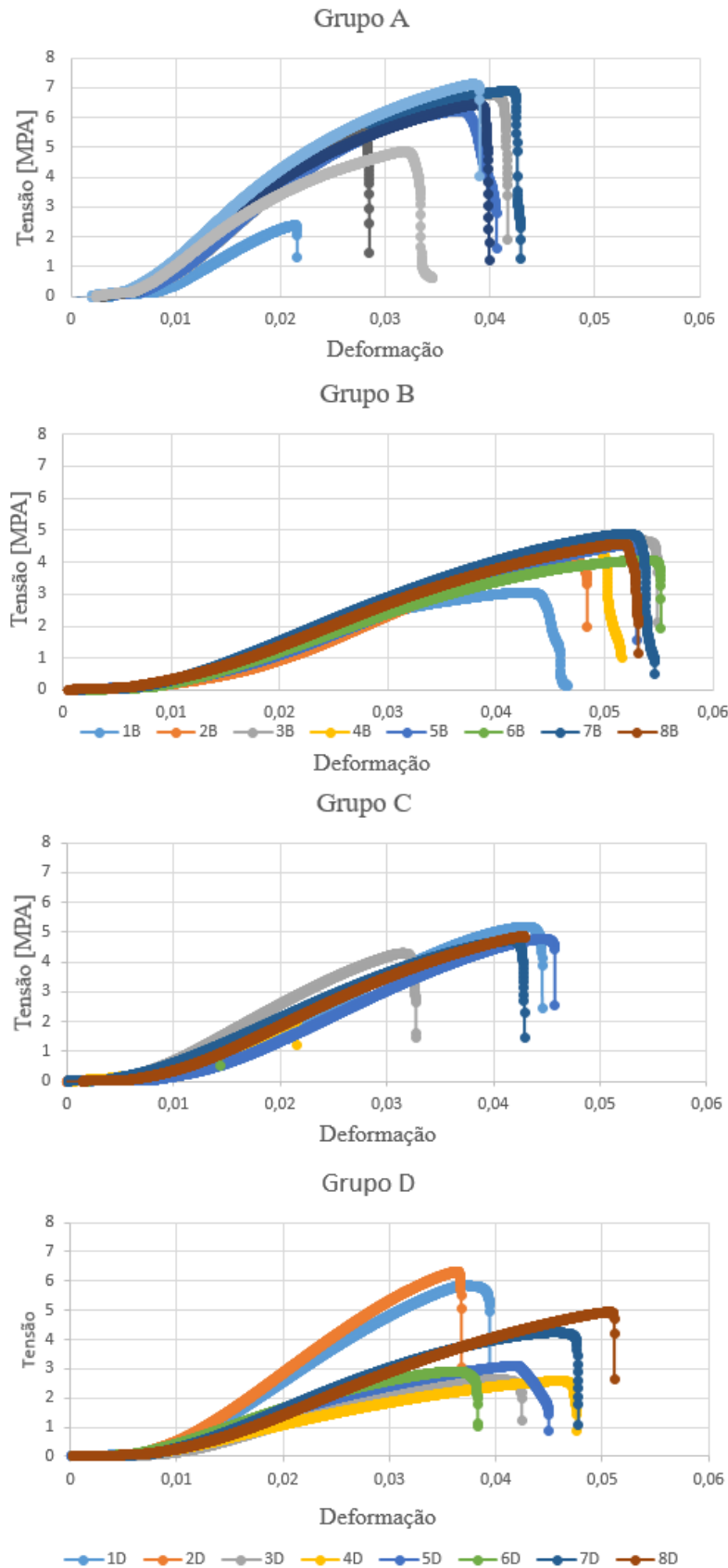
5.2 TENSÃO MÁXIMA

A tensão é a resistência ao carregamento longitudinal em tração, assim, pela relação entre a força (F) e a área (A) pode-se determinar a tensão (σ), como demonstrado na Equação 1.

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (1)$$

Para uma melhor visualização dos ensaios mecânicos de tração foram construídas curvas de tensão-deformação para cada grupo de corpos de prova, apresentados na Figura 17, sendo que o Grupo A representa as curvas tensão-deformação para os corpos de prova (CPs) com espessura de 4 mm, o Grupo B as curvas tensão-deformação para os CPs com espessura de 7 mm e o Grupo C as curvas tensão-deformação para os CPs com 12 mm de espessura, enquanto o Grupo D apresenta os resultados para os CPs com espessura de 10 mm. Para cada grupo foram ensaiados oito corpos de prova em uma máquina de ensaio universal.

Figura 17 – Curvas tensão-deformação para o material composto polietileno e alumínio (Grupo A = 4 mm, Grupo B = 7 mm, Grupo C = 12 mm, Grupo D = 10 mm).



Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

Analisando a Figura 17, pode-se perceber que os gráficos apresentam um comportamento muito semelhante entre os grupos, com exceção do Grupo D onde houve algumas variações de tendência quanto à curva.

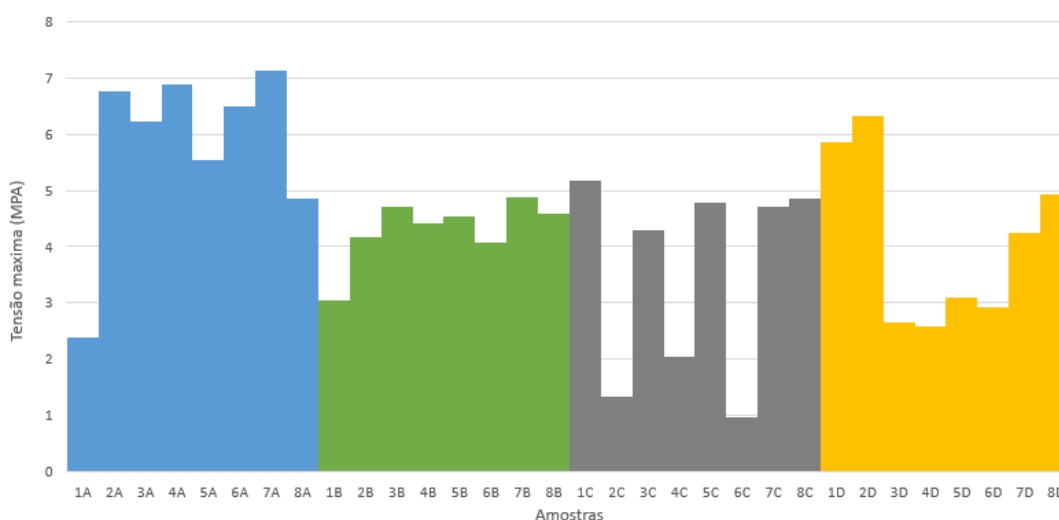
A Tabela 5 apresenta os valores para a tensão máxima obtidos a partir das curvas tensão-deformação para os oito corpos de prova e o desvio padrão calculado para cada grupo, enquanto a Figura 18 apresenta os resultados em uma forma gráfica para facilitar a comparação entre os resultados.

Tabela 5 – Valores para a tensão máxima calculados a partir das curvas tensão-deformação

CP	Grupo A [MPa]	Grupo B [MPa]	Grupo C [MPa]	Grupo D [MPa]
1	2,38	3,05	5,18	5,87
2	6,77	4,17	1,33	6,33
3	6,24	4,70	4,30	2,64
4	6,89	4,43	2,04	2,58
5	5,54	4,53	4,77	3,09
6	6,49	4,07	0,97	2,91
7	7,12	4,88	4,72	4,24
8	4,86	4,58	4,86	4,94
Média	5,79	4,30	3,52	4,08
Desvio padrão	1,57	0,57	1,76	1,50

Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

Figura 18 – Comparação dos valores dos Grupos A, B, C e D para a tensão máxima das placas compósitas.



Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

A análise da Tabela 5 e da Figura 18 evidencia que o Grupo A foi o que apresentou os maiores valores de tensão máxima, chegando a 7,12 MPa, mas o grupo também apresentou uma grande variação, tendo um dos CPs tensão máxima baixa, com 2,38 MPa. O Grupo B foi o grupo no qual as curvas apresentaram um comportamento muito semelhante, com inclinações idênticas, o que reflete um bom comportamento da matéria prima, demonstrando assim uma menor incidência de defeitos nos corpos de prova. Os valores obtidos apresentaram uma tensão máxima média de 4,30 MPa. O Grupo C, apesar de ter uma inclinação semelhante dentro do grupo, apresentou a maior variação quanto à tensão máxima. Isso pode ter ocorrido devido a uma matéria prima úmida ou a uma baixa mistura do material antes da formação da placa compósita na prensa, resultando em regiões com grande concentração de polímero.

Já o Grupo D apresentou um comportamento diferente dos outros grupos. Além de apresentar uma variação da inclinação da curva, o mesmo apresentou uma grande diferença para os valores da tensão máxima tendo, por exemplo, duas amostras com valor de tensão máxima superior a 5,00 MPa e três amostras com um valor inferior a 3,00 MPa. Tal comportamento pode indicar a presença de algum corpo estranho no meio das amostras. Tal situação acaba por acontecer mesmo com um elevado controle de qualidade da matéria prima, uma vez que a mesma é oriunda da coleta de lixo reciclado, sendo que no processo de separação pode passar despercebido algum material de composição diferente do polietileno das embalagens cartonadas. Outra possibilidade é que as rebarbas adicionadas à matéria prima tenham formado regiões na massa com baixa homogeneidade.

A análise dos resultados demonstra que existe dentro dos próprios grupos variações significativas nos valores da tensão máxima. Para o Grupo A, os valores variavam de um máximo de 7,12 MPa até um mínimo de 2,38 MPa, sendo que o Grupo A apresentou um desvio padrão de 1,57 MPa, muito semelhante ao Grupo D, que ficou em 1,50 MPa. Porém, o Grupo D obteve como maior valor de tensão máxima 6,33 MPa e o valor mínimo 2,58 MPa.

O Grupo B foi o que apresentou a menor dispersão resultado com 0,57 MPa de desvio padrão e com tensão máxima de 4,88 MPa e mínima de 3,05 MPa, ocorrendo uma variação entre o maior e o menor valor de 1,83 MPa.

O grupo C por sua vez foi o que apresentou a maior dispersão resultado, com um desvio padrão de 1,76 MPa, com uma tensão máxima de 5,18 MPa e uma mínima de 0,97 MPa e a sua diferença entre o valor máximo e mínimo ficou em 4,21 MPa. Se comparamos com os demais grupos, essa diferença é a segunda maior, só perdendo para o grupo A com 4,74 MPa.

Para os valores médios das tensões máximas foram obtidos 5,79 MPa para o Grupos A, 4,30 MPa para o Grupo B, 3,52 MPa para o Grupo C e 4,08 MPa para o Grupo D.

Com o intuito de verificar possíveis variações na média de tensão máxima foi realizada uma análise estatística dos valores encontrados, sendo construído um intervalo de confiança para verificar se o comportamento do material muda em função da espessura, bem como se as propriedades permanecem constantes dentro de cada grupo. Para o estudo da tensão máxima foi realizada uma análise estatística utilizando a metodologia ANOVA, considerando um nível de significância de 5% para o ensaio de tração. Pelo resultado da ANOVA, rejeita a hipótese nula (H_0), aceitando a Hipótese (H_1), ou seja, houve diferença significativa entre as médias das tensões máximas em pelo menos um dos grupos, com uma probabilidade de significância de 2,3%. A Figura 19 apresenta os intervalos de confiança da ANOVA para a tensão máxima calculada a partir das curvas tração-deformação.

Figura 19 – Análise estatística ANOVA para os valores de tensão máxima.



Fonte: Autor (2020)

Observando a Figura 19, pode-se afirmar que a média de tensão máxima do Grupo A é maior que a média do Grupo B, mas observa-se também que o limite inferior do Grupo A, com 4,70 MPa, é praticamente igual ao limite superior do Grupo B, com 4,69 MPa. Na comparação do Grupo A com os Grupos C e D não é possível afirmar que exista uma tensão maior, uma vez que os intervalos de confiança se interceptam, não sendo possível garantir que o aumento da espessura tenha causado uma variação da tensão máxima. A grande diferença de tensão máxima no Grupo A pode ser decorrente das incertezas quanto à matéria prima utilizada. A intersecção dos Grupos A e D pode ser devida a adição no Grupo D do pó oriundo das rebarbas, o que pode ter causado o aumento da tensão máxima. Além disso, para uma análise mais precisa, seria necessária a análise de um grupo maior de placas, bem como a produção das mesmas no mesmo dia, garantindo condições climáticas iguais, e um melhor controle da umidade da matéria prima.

5.3 TENSÃO DE RUPTURA

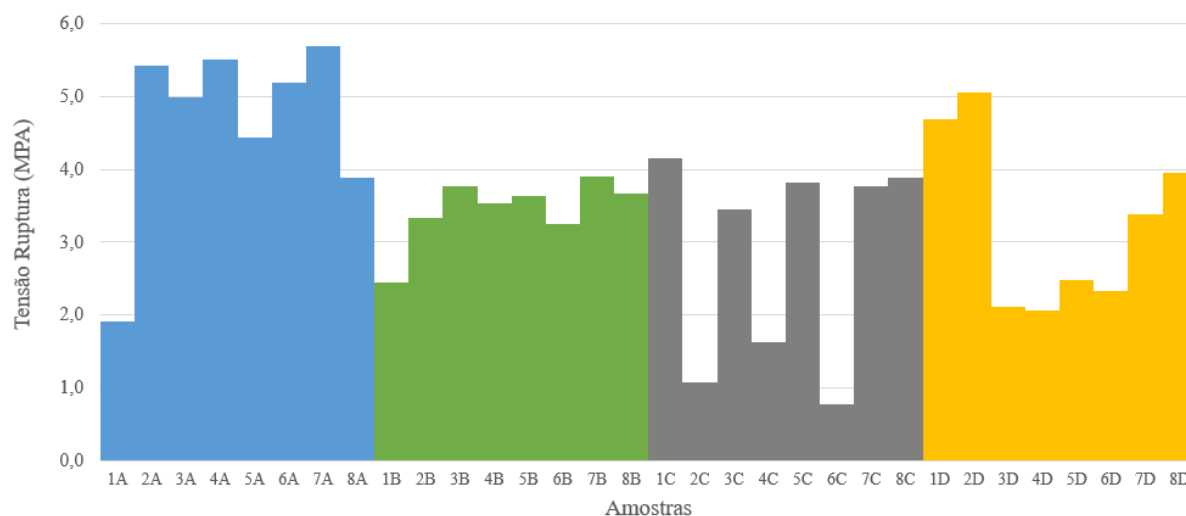
A partir das curvas tensão-deformação apresentadas na Figura 17 foi determinada a tensão de ruptura em cada amostra. Devido à grande deformação plástica, a tensão de ruptura foi considerada como o ponto onde houve um decaimento de 20% da tensão máxima. A tensão de ruptura é o maior valor de carga axial observada no ensaio de tração, imediatamente antes de causar a ruptura do material, a Tabela 6 e a Figura 20 apresentam os valores da tensão de ruptura para os quatro grupos de corpos de prova que representam as placas de material compósito com as diferentes espessuras.

Tabela 6 – Tensão de ruptura das placas compósitas polietileno e alumínio

CP	Grupo A [MPa]	Grupo B [MPa]	Grupo C [MPa]	Grupo D [MPa]
1	1,90	2,43	4,14	4,69
2	5,41	3,33	1,06	5,06
3	4,98	3,75	3,44	2,11
4	5,51	3,54	1,63	2,06
5	4,42	3,62	3,81	2,47
6	5,18	3,25	0,77	2,33
7	5,69	3,90	3,77	3,39
8	3,88	3,66	3,88	3,95
Média	4,62	3,44	2,81	3,26
Desvio padrão	1,25	0,45	1,40	1,19

Fonte: Autor (2020).

Figura 20 – Comparação dos valores para a tensão de ruptura das placas compósitas.



Fonte: Autor (2020)

A análise da Tabela 6 e da Figura 20 demonstra que o Grupo A, que representa a chapa com 4 mm de espessura, apresenta um valor médio de tensão de ruptura de 4,63 MPa. Os menores resultados quanto a tensão de ruptura no Grupo A foram encontrados nas amostras A1 e A8, com valores de 1,90 MPa e 3,88 MPa. Essa diferença em relação à média pode ter origem na compactação do material, uma vez que as amostras são oriundas da mesma placa. Já a amostra A1 pode ter a presença de algum corpo estranho, provocando a diminuição da tensão de ruptura.

No Grupo B, cujos CPs representam corpos de prova com espessura de 7 mm, percebe-se que o grupo apresentou uma estabilidade quanto a tensão de ruptura, obtendo a média de 3,44 MPa e o menor desvio padrão entre os grupos, com 0,45 MPa.

O grupo C obteve um valor médio de tensão de ruptura de 2,81 MPa, porém apresentou uma grande variação, como nas amostras C2 e C6, onde foram obtidos valores de 1,06 MPa e 0,77 MPa, o que resultou no maior desvio padrão encontrado entre os grupos, com 1,40 MPa. Na análise visual do material é possível facilmente identificar materiais que são oriundos das tampas das embalagens presentes no meio. Em geral, essas tampas são formadas por polipropileno, polímero com propriedades diferentes do polietileno e que acaba influenciando nos resultados.

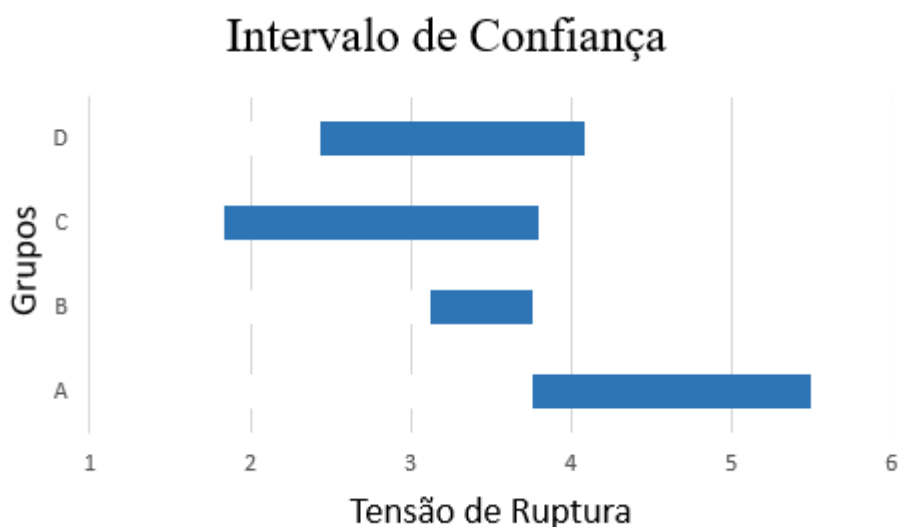
O Grupo D obteve o maior valor de tensão de ruptura na amostra 2D com 5,06 MPa e o menor valor na amostra 4D com 2,11 MPa, mesmo contando com 50% de pó em sua composição. Este grupo apresentou o desvio padrão de 1,19 MPa. Quando são comparados os menores valores para a tensão de ruptura, o grupo B foi o que obteve o maior valor, com 2,43

MPa, levemente superior aos outros grupos, onde tem-se o Grupo A, Grupo C e Grupo D com 1,90 MPa, 0,77 MPa e 2,11 MPa, respectivamente. O menor valor de desvio padrão no grupo B pode ser fruto de um melhor arranjo quanto a matéria prima, uma vez que o processo é manual.

Os valores médios de tensão de ruptura dos grupos A, B, C e D com 4,62 MPa, 3,44 MPa, 2,81 MPa e 3,26 MPa, respectivamente, estão de acordo com os resultados obtidos por Cerqueira et al. (2002), que obtiveram valores para a tensão de ruptura variando entre 0,49 e 7,62 MPa.

Uma análise estatística utilizando o teste ANOVA foi realizada para verificar se os comportamentos são semelhantes ou divergem. Para tal análise foi considerado um nível de significância de 5%. Pelo resultado da ANOVA, rejeitasse-se a hipótese nula (H_0), ou seja, há diferença entre as tensões de ruptura nos grupos, com uma probabilidade de significância de 23,42%. A Figura 21 apresenta os intervalos de confiança da ANOVA para o ensaio de tração referente à tensão de ruptura.

Figura 21 – Análise estatística ANOVA para os valores de tensão de ruptura.



Fonte: Autor (2020)

A tensão de ruptura é a última tensão observada antes da ruptura, de tal forma que ela representa a falha do material em uma situação de tração. Com os resultados da ANOVA pode-se afirmar que existe diferença entre as tensões de ruptura dos grupos. Pelo intervalo de confiança pode-se visualizar essa diferença, uma vez que os Grupos B e C não tiveram

intersecção com o grupo A. Como os grupos B, C e D tiveram intersecção, não podemos afirmar que o aumento da espessura causa alteração na tensão de ruptura.

5.4 MÓDULO DE ELASTICIDADE

O módulo de elasticidade é uma propriedade mecânica que é de suma importância para determinar o comportamento do material na fase elástica. Os módulos de elasticidade das chapas compósitas polietileno e alumínio foram determinados a partir das curvas tensão-deformação apresentadas na Figura 17. Para o cálculo do módulo de elasticidade foi utilizada a parte elástica da curva tensão-deformação, na qual foi considerado o intervalo linear comum a todas as amostras. Os resultados obtidos foram obtidos através do método da tangente para o cálculo dos valores para o módulo de elasticidade.

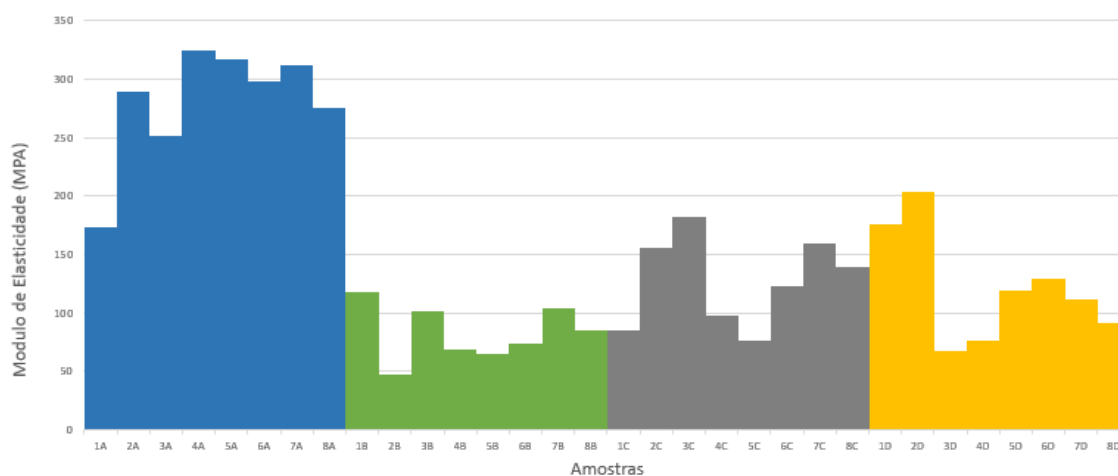
A Tabela 7 apresenta os valores referentes aos módulos de elasticidade calculados, onde a tensão de cada amostra foi obtida a partir dos ensaios de tração realizados (Figura 17) e as áreas calculadas para cada corpo de prova conforme Apêndice A.

Tabela 7 – Módulos de elasticidade calculados para cada corpo de prova obtido das placas compósitas formadas por polietileno e alumínio

CP	Grupo A [MPa]	Grupo B [MPa]	Grupo C [MPa]	Grupo D [MPa]
1	173,25	118,40	84,57	175,51
2	289,82	47,85	155,34	204,00
3	252,20	101,77	182,62	67,97
4	325,08	69,28	98,22	76,74
5	317,25	64,77	76,77	118,80
6	298,20	73,91	122,82	129,31
7	312,57	103,57	159,45	111,68
8	275,29	85,51	139,85	91,62
Média	280,46	83,13	127,46	121,95
Desvio padrão	49,42	23,52	38,33	47,28

Fonte: Autor (2020).

Figura 22 – Comparação dos valores para o módulo de elasticidade das placas compósitas.



Fonte: Autor (2020).

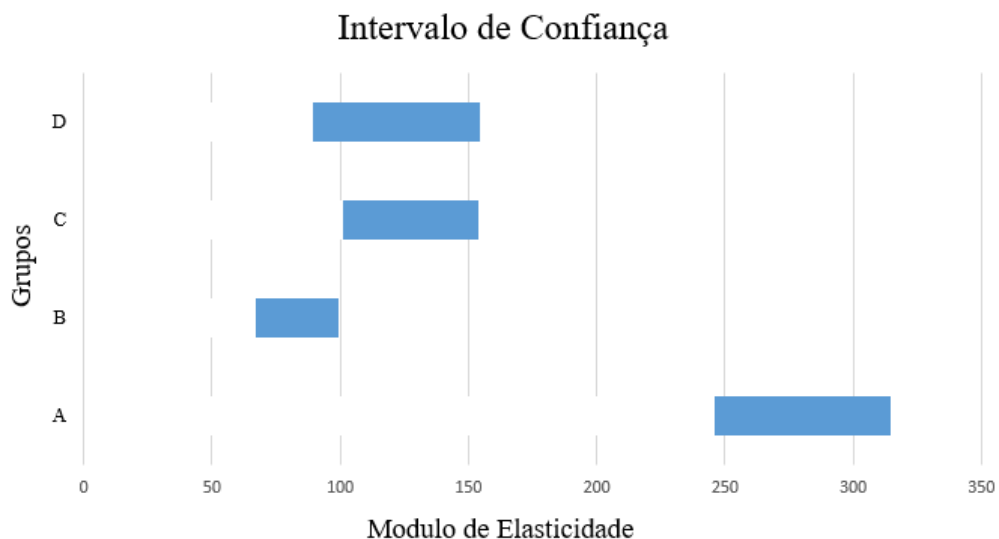
A análise da Tabela 7 e da Figura 22 demonstra que o Grupo A tem um valor de módulo de elasticidade médio de 280,46 MPa, superior aos outros grupos, sendo que para o Grupo B o valor foi de 83,13 MPa, para o Grupo C 127,46 MPa e para o Grupo D 121,95 MPa. Quando são comparados os Grupos B e C com o Grupo A, percebe-se que o módulo de elasticidade diminui com o aumento da espessura.

Já na comparação entre os Grupos A e D, onde o Grupo D apresenta uma espessura maior que a do Grupo A, novamente nota-se a redução do módulo de elasticidade com o aumento da espessura. Isto pode estar relacionado a composição da placa compósita do Grupo D, que apresenta em sua composição uma mistura da matéria prima polietileno e alumínio com o pó do corte das bordas das placas compósitas, esperava-se uma maior proximidade dos valores dos módulos de elasticidade para os Grupos A e D, uma vez que o grupo A apresentaria uma melhor compactação em função da menor espessura por contar com os mesmos parâmetros de processo, sendo temperatura de 160 °C e tempo de processo 30 minutos. A única diferença seria a formulação dos componentes da placa do Grupo D, que contaria com o pó em sua composição. Para o Grupo D, em função de conter o pó das rebarbas junto ao polietileno e alumínio, esperava-se uma melhor compactação, o que resultaria melhores valores de módulo de elasticidade. Porém, o grupo D apresentou um valor médio muito inferior ao grupo A.

Com intuito de melhorar a análise do módulo de elasticidade e suas variações foi realizada uma análise de ANOVA com um nível de significância de 5%. Pelo resultado da ANOVA, rejeita a hipótese nula (H0), aceitando a Hipótese (H1), ou seja, houve diferença significativa entre as médias do módulo de elasticidade em pelo menos um dos grupos – com

uma probabilidade de significância de 9×10^{-10} %. A Figura 23 apresenta os intervalos de confiança da ANOVA para os resultados relativos ao módulo de elasticidade dos compósitos.

Figura 23 – Análise estatística ANOVA para os valores do módulo de elasticidade.



Fonte: Autor (2020)

Analisando a Tabela 7 e Figura 23 nota-se que o Grupo A obteve um valor para o módulo de elasticidade de 280,46 MPa, superior aos valores obtidos para os módulos de elasticidade do Grupo B (83,13 MPa), Grupo C (127,46 MPa) e Grupo D (121,95 MPa). Porém, ao comparar o Grupo B com os Grupos C e D não é possível afirmar que o aumento da espessura causou a diminuição dos módulos de elasticidade uma vez que ao comparar os Grupos através do intervalo de confiança percebemos que o Grupo A para o Grupo B houve uma diminuição do módulo de elasticidade com o aumento da espessura, quando analisamos do Grupo B para o Grupo C vemos o comportamento inverso onde o aumento da espessura causou um aumento do módulo de elasticidade, por último ao olhar do Grupo C para o Grupo D onde a uma redução da espessura de 12 mm para 10 mm vemos uma interação dos intervalos de confiança onde os módulos de elasticidade são iguais.

O módulo de elasticidade do polietileno pode variar de 102 a 240 MPa, enquanto o alumínio possui módulo de elasticidade de 70000 MPa (ABAL, 2019; COUTINHO; MELLO; MARIA, 2003). Ao compararmos as médias dos módulos de elasticidade dos Grupo B (83,13 MPa), C (127,46 MPa) e D (121,95 MPa), é possível perceber que as médias se aproximaram ao valor esperado para o polietileno. Este resultado pode ser considerado dentro do esperado, uma vez que a fração de polímero é maior no compósito. Porém, o Grupo A, com uma média

para o módulo de elasticidade de 280,46 MPa, apresentou um valor superior ao esperado. Isto pode ter acontecido devido a uma melhor compactação do material, uma vez que a chapa apresenta a menor espessura. Assim, uma maior compactação deixa as cadeias poliméricas mais próximas, favorecendo uma maior força de interação entre elas e também entre as cadeias do polímero e o alumínio presente, causando assim um aumento do módulo de elasticidade. Outra possibilidade é uma maior presença de alumínio na placa compósita devido a um erro na preparação da mistura polietileno e alumínio, o que causaria um aumento do módulo de elasticidade.

5.5 DUREZA SHORE D

Para a caracterização da dureza do material compósito foi realizado o teste de dureza Shore D, o qual é adequado para materiais compósitos e polímeros. O ensaio foi realizado utilizando um durômetro SHORE D, no qual o valor foi tomado no ponto principal do corpo de prova.

A Tabela 8 apresenta a dureza de todas as amostras analisadas, bem como o desvio padrão calculado para cada grupo de CPs.

Tabela 8 – Resultados da Dureza Shore D para as placas do material compósito polietileno e alumínio

Grupo A (4 mm)		Grupo B (7 mm)		Grupo C (12 mm)		Grupo D (10 mm)	
Amostra	Dureza	Amostra	Dureza	Amostra	Dureza	Amostra	Dureza
1A	52	1B	45	1C	57	1D	58
2A	40	2B	48	2C	53	2D	54
3A	59	3B	40	3C	46	3D	57
4A	44	4B	39	4C	50	4D	49
5A	47	5B	37	5C	57	5D	44
6A	56	6B	51	6C	56	6D	58
7A	50	7B	40	7C	59	7D	57
8A	41	8B	55	8C	61	8D	54
Média	49	Média	44	Média	55	Média	54
Desvio padrão	7	Desvio padrão	6	Desvio padrão	5	Desvio padrão	5

Fonte: Autor (2020).

A partir dos resultados da Tabela 8 é possível verificar que a amostra 3A apresentou o maior valor de dureza dentro do Grupo A, com 59 Shore D. Este valor elevado pode ser

decorrente de corpos estranhos presentes no material, pois não é realizada uma triagem da matéria prima que chega à empresa.

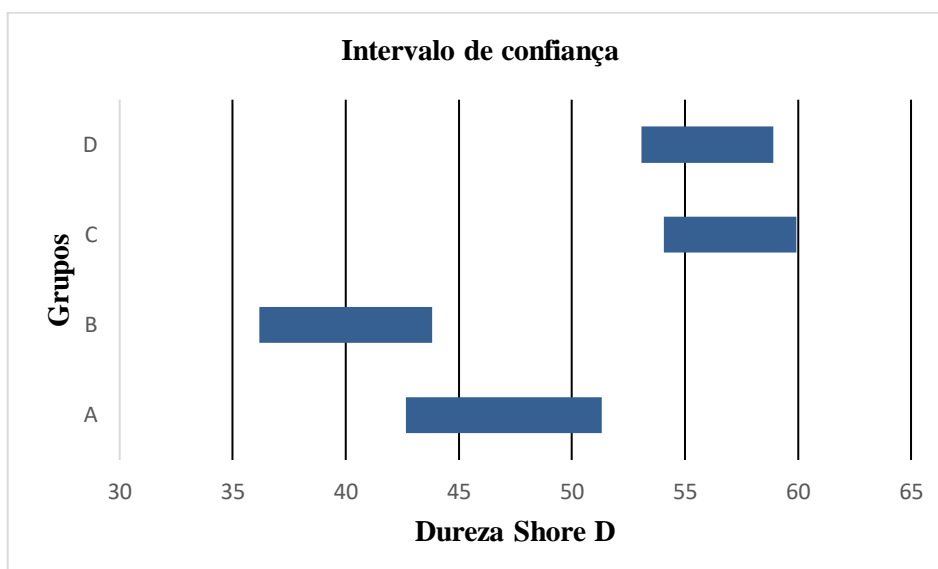
O Grupo B foi o que obteve o menor valor de dureza média com 44 Shore D. Estes valores menores podem ter relação com a compactação do material, onde podemos ter uma presença maior de polietileno ou até mesmo a presença de impurezas no material.

Já os valores do Grupo C tiveram a menor variação nos valores da dureza, com um desvio padrão de 5 Shore D. Essa maior estabilidade quanto a dureza pode estar relacionada a estabilidade na compactação do material.

Para o Grupo D esperava-se uma dureza maior e mais uniforme por conter em sua composição 50% de pó oriundo do corte de rebarbas, porém foi observado que a sua dureza média foi muito semelhante aos valores encontrados para o Grupo C, onde a matéria prima não contava com o pó proveniente das rebarbas em sua composição.

Para uma melhor comparação das médias foi realizado um tratamento estatístico pela análise de Variância (ANOVA), considerando um nível de significância de 5%, para verificar se as durezas alteram entre os Grupos ou mesmo se há divergência entre os mesmos. A Figura 24 apresenta os resultados da análise realizada, na qual temos o intervalo de confiança das médias em função da ANOVA.

Figura 24 – Análise estatística ANOVA para os valores da dureza Shore D.



Fonte: Autor (2020)

Com base na ANOVA, pode-se rejeitar a hipótese de que as medidas são iguais (H_0). Desta forma, é assumida a hipótese alternativa (H_1), na qual pelo menos uma das amostras tem média diferente com probabilidade de significância de 0,000493%.

Com base na Figura 24 é possível concluir que a dureza média do Grupo A, com 49 Shore D, é a mesma que a do Grupo B, com 44 Shore D, uma vez que seus intervalos de confiança tem um ponto de intercessão. O Grupo C foi o grupo que apresentou o menor desvio padrão, com 5 Shore D e uma dureza média de 55 Shore D. Dessa forma, apresenta a maior dureza entre os grupos com o menor desvio padrão. O Grupo D apresentou uma dureza média de 54 Shore D, muito parecida com o Grupo C, com 55 Shore D, sendo que em relação ao Grupo A, com 49 Shore D, obteve-se um aumento da dureza. De forma geral não é possível concluir que a dureza aumenta com a espessura, uma vez que os Grupos A e B obtiveram a mesma dureza.

5 CONCLUSÕES

Este trabalho analisou placas compósitas formadas por uma matriz polimérica de polietileno de baixa densidade (PEBD) e alumínio como reforço, sendo os materiais utilizados provenientes da reciclagem de embalagens cartonadas do tipo longa vida. Foram determinadas algumas das suas propriedades mecânicas e verificado se o processo utilizado para a produção das placas permite um controle dimensional quanto à espessura nominal dos compósitos.

No processo de determinação das espessuras das placas compósitas constatou-se uma variação nas espessuras esperadas, uma vez que os valores nominais para a espessura de cada chapa eram de 4 mm (Grupo A), 7 mm (Grupo B), 12 mm (Grupo C) e 10 mm (Grupo D). Os valores encontrados experimentalmente para a espessura média foram 3,89 mm, 7,24 mm, 11,94 mm e 9,49 mm para os Grupos A, B, C e D, respectivamente. Através da análise estatística ANOVA, representada no intervalo de confiança, não é possível afirmar que a variação das espessuras é significativa. Porém, quando se observa o nicho de mercado em que o produto é aplicado (telhas, placas para a substituição de tapume, revestimento de compartimentos de carga), nota-se que essas alterações na espessura não trazem nenhum dano à aplicação do compósito produzido.

Quanto aos valores para a tensão máxima, foram encontrados valores médios de 5,79 MPa, 4,30 MPa, 3,52 MPa e 4,08 MPa para Grupos A, B, C e D, respectivamente. Com a análise estatística não é possível garantir que o aumento da espessura tenha causado uma variação da tensão máxima. A maior variação no Grupo A pode ser decorrente das incertezas quanto à matéria prima utilizada no processo, a intersecção do Grupo A com o Grupo D pode ter origem em função do grupo D contar com a adição do pó oriundo das rebarbas, o que pode ter causado o aumento da tensão máxima. Para uma análise mais aprofundada há a necessidade de se estudar um grupo maior de placas, além de garantir as condições climáticas durante a sua produção.

Na tensão de ruptura, os Grupos A, B, C e D apresentaram valores médios de 4,62 MPa, 3,44 MPa, 2,81 MPa e 3,26 MPa, valores baixos quando comparados a tensão de ruptura do PEBD (15 a 20 MPa) e do alumínio (110 MPa) (ACADEMIA, 2018; BRASKEM, 2020). A amostra 3C obteve um valor de apenas 0,77 MPa, muito inferior em relação a todas as amostras. Este valor pode ser devido a algum corpo estranho em seu interior, ocasionando a diminuição da tensão de ruptura. A Análise da ANOVA demonstrou não se pode afirmar que o aumento da espessura causou a alteração da tensão de ruptura. O maior valor de tensão média de ruptura de 4,62 MPa, encontrado para o Grupo A, pode ser fruto de uma melhor compactação das chapas compósitas, uma vez que o tempo e a temperatura de processo foram comuns a todos os grupos.

O módulo de elasticidade para o Grupo A obteve um valor de 280,46 MPa, superior aos valores obtidos para os módulos do Grupo B (83,13 MPa), Grupo C (127,46 MPa) e Grupo D (121,95 MPa). Estes valores estão coerentes com os valores para o módulo de elasticidade dos materiais puros, que é de 102-204 MPa para o polietileno de baixa densidade e de 70 GPa para o alumínio. Através das análises estatísticas foi possível perceber que entre os grupos B, C e D não é possível afirmar que a variação da espessura causou alteração no módulo de elasticidade. Porém, quando é comparada a placa A com os outros grupos, nota-se uma diminuição do módulo de elasticidade com o aumento da espessura. Provavelmente com uma quantidade maior de amostras seria possível observar melhor esta variação.

Quando se analisa a dureza média dos grupos A, B, C e D, com 48, 44, 55 e 54 Shore D, respectivamente, pode-se notar através do intervalo de confiança que os Grupos A e Grupo B têm a mesma dureza. Já quando são comparados os grupos C e D com o grupo A, observa-se uma diminuição da dureza. Porém não é possível afirmar que existe uma diminuição da dureza em função da espessura, uma vez que os grupos C e D, através do intervalo de confiança, apresentam a mesma dureza, apesar de existir uma diferença de espessura entre os grupos, com 12 mm para o Grupo E e 10 mm para o Grupo D. A análise estatística permite dizer que não existe diferença entre a dureza média dos Grupos A, com 49 Shore D, e do Grupo B, com 44 Shore D, de modo que não existe uma variação da dureza com o aumento da espessura das placas compósitas.

Podemos concluir que as placas têm propriedades mecânicas muito semelhantes ao PEBD, porém com algumas propriedades melhoradas, como é o caso da dureza, o que demonstra uma melhora da propriedade com a presença do alumínio. Para o módulo de elasticidade, as placas com 4 mm de espessura apresentaram valores superiores ao valor máximo esperado para o PEBD (240 MPa), chegando a 325,08 MPa para a Amostra 4A. Já nas demais espessuras o módulo de elasticidade ficou muito próximo ao esperado para PEBD. Desta forma, é possível concluir que as placas se aproximaram do PEBD.

O material compósito estudado nesse trabalho apresenta propriedades muito interessantes, podendo substituir o PEBD em diversas aplicações. Com alguns ajustes de processo e matéria prima, sugere-se que é possível melhorar ainda mais as propriedades do material compósito.

6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

A partir dos resultados obtidos neste estudo, e pelo fato de tratar-se de um material anisotrópico, com a composição podendo variar ao longo de uma mesma amostra, sugere-se:

1. Aumentar o número de pontos de medição para o cálculo da espessura média das placas compósitas;
2. Realizar um número maior de medidas em cada placa para o cálculo da dureza da amostra;
3. Analisar a influência das variáveis tempo e temperatura do processo nas propriedades mecânicas das placas compósitas;
4. Adição de fibras em sua composição para analisara melhoria das propriedades mecânicas, como, por exemplo, fibra de coco, fibra de vidro, etc.
5. Estudar as propriedades térmicas no sentido de usar o material como uma barreira térmica.
6. Realizar a medição da densidade de forma matemática e pelo método de Arquimedes.

REFERÊNCIAS

- ABAL, Associação Brasileira do Alumínio. Características Químicas e Físicas. 2019. Disponível em: <http://abal.org.br/aluminio/caracteristicas-quimicas-e-fisicas/>. Acesso em: 13 ago. 2020.
- ABIPLAST. Industria brasileira de transformação e reciclagem de material plástico. 2017. Disponível em: <http://www.abiplast.org.br/wp-content/uploads/2019/03/Perfil-2017.pdf>. Acesso em: 12 ago. 2020.
- ABRELPE. Panorama dos resíduos sólidos no brasil. 2019. Disponível em: <https://abrelpe.org.br/download-panorama-2018-2019/>. Acesso em: 20 ago. 2020.
- ABREU, Lucas Henrique de. DESENVOLVIMENTO DECOMPÓSITO OBTIDO A PARTIR DA RECICLAGEM DE EMBALAGENS CARTONADAS. 2017. 61 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia de Materiais, Centro Federal de Educaçãotecnológica de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2017. Cap. 50.
- ACADEMIA, Luso. Teoria da Elasticidade. 2018. Disponível em: <https://lusoacademia.org/2018/11/04/sismologia-i/>. Acesso em: 09 set. 2020.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM D 790: Standard Test Methods for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials.. ASTM Standard D 790 ed. West Conshohocken: Astm International, 2003. 11 p.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. D3039: Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials. D 3039/D 3 ed. West Conshohocken: Astm International, 2002. 13 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM 188-1: Medição da dureza Vickers. 2 ed. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1999. 101 p.
- BILLMEYER, Wiley. Textbook of polymer science: Polymers and polymerization. 3. ed. New York: John Wiley & Sons, Inc, 1984. 578 p.
- BRASIL. INSTITUTO DE PESQUISA ECONÔMICA APLICADA. Apenas 13% dos resíduos sólidos urbanos no país vão para reciclagem. 2017. Disponível em: http://www.ipea.gov.br/portal/index.php?option=com_content&view=article&id=29296. Acesso em: 16 set. 2018.
- BRASIL. MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. Impacto das embalagens no meio ambiente. 2018. Disponível em: <http://www.mma.gov.br/responsabilidade-socioambiental/producao-e-consumo-sustentavel/consumo-consciente-de-embalagem/impacto-das-embalagens-no-meio-ambiente>>. Acesso em: 11 set. 2018.
- BRASIL. MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. Política Nacional de Resíduos Sólidos. 2010. Disponível em: <http://www.mma.gov.br/cidades-sustentaveis/residuos-solidos/politica-nacional-de-residuos-solidos>>. Acesso em: 09 set. 2018.

BRASIL. MINISTERIO DO MEIO AMBIENTE. . Reciclagem. 2020. Disponível em: <https://www.mma.gov.br/informma/item/7656-reciclagem>. Acesso em: 12 set. 2020.

EM DISCUSSÃO. Rumo a 4 bilhões de toneladas por ano. Disponível em: <http://www.senado.gov.br/noticias/jornal/emdiscussao/residuos-solidos/materia.html?materia=rumo-a-4-bilhoes-de-toneladas-por-ano.html>. Acesso em: 11 ago. 2020.

BRASKEM. GLOSSÁRIO DE TERMOS APLICADOS A POLÍMEROS: boletim técnico. 2000. Disponível em: <https://www.braskem.com.br/Portal/Principal/Arquivos/html/boletm_tecnico/Glossario_de_termos_aplicados_a_polimeros.pdf>. Acesso em: 01 jun. 2019.

BRASKEM. Poliolefinas: tabela de propriedades. 2020. Disponível em: <https://www.braskem.com.br/portal/Principal/arquivos/docs/pt-BR/Propriedades.pdf>. Acesso em: 09 set. 2020.

CALLISTER, Wiliam; RETHWISCH, David. Ciência e Engenharia de Materiais: uma introdução. 8. ed. Utah: Ltc, 2012. 817 p.

CEMPRE (Brasil). Embalagem Longa Vida. 2018. Disponível em: <<http://cempre.org.br/artigo-publicacao/ficha-tecnica/id/9/embalagens-longa-vida>>. Acesso em: 08 set. 2018.

CERQUEIRA, Mario Henrique de. PLACAS E TELHAS PRODUZIDAS A PARTIR DA RECICLAGEM DO POLIETILENO / ALUMÍNIO PRESENTES NAS EMBALAGENS TETRA PAK. 2002. Disponível em: https://limpezaurbana.com.br/textos/artigo_telhas.pdf. Acesso em: 14 ago. 2020.

COUTINHO, Fernanda M. B.; MELLO, Ivana L.; MARIA, Luiz C. de Santa. Polietileno: Principais Tipos, Propriedades e Aplicações. 2003. Disponível em: <https://www.scielo.br/pdf/po/v13n1/15064>. Acesso em: 12 ago. 2020.

ECO, Mega Telhas. Van revestidas com Placas Ecológicas. 2020. Disponível em: <https://www.megatelhas.eco.br/fotos.php?id=29>. Acesso em: 28 ago. 2020.

EMIC. SÉRIE 23 EMIC TRAÇÃO, FLEXÃO. 2018. Disponível em: <http://www.emic.com.br/Produtos+Mostra/4/77/235/Maquina+universal+para+ensaios+mecanicos+de+tracao_compressao_flexao_etc_modelo+EMIC+23_100_eletromecanica_microprocessada_marca+INSTRON_EMIC/>. Acesso em: 04 nov. 2018.

GUTIÉRREZ, Juan Carlos Horta; RUBIO, Juan Carlos Campos; FARIA, Paulo Eustáquio de; DAVIM, João Paulo. Usinabilidade de materiais compósitos poliméricos para aplicações automotivas. Polímeros, [S.L.], v. 24, n. 6, p. 711-719, dez. 2014. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/0104-1428.1582>.

HIND, Andrew R.; BHARGAVA, Suresh K.; GROCOTT, Stephen C. The surface chemistry of Bayer process solids. Science Direct. Melbourne, p. 359-374. 13 ago. 1998.

INCOMESP. Prensa. Disponível em: <<http://www.incomesp.com.br/?f=galeria.php&c=36>>. Acesso em: 04 nov. 2018.

ISWA. The world's 50 biggest dumpsites. 2014. Disponível em: <http://www.atlas.d-waste.com/Documents/Waste-Atlas-report-2014-webEdition.pdf>. Acesso em: 28 ago. 2020.

KDHINDAW, Brij; GOWRAWARAMSLADITYA; ANDANIMESHMANDAL. Recycling and Downstream Processing of Aluminium Alloys for Automotive Applications: Energy Consideration and Sustainability of Aluminium Alloys. Science Direct. Bhubaneswar, p. 1-8. 06 abr. 2019.

MAZALI, Italo Odone. Determinação da Densidade de sólidos pelo método de arquimedes. Disponível em: http://lqes.iqm.unicamp.br/images/vivencia_lqes_meprotec_densidade_arquimedes.pdf. Acesso em: 12 maio 2020.

MIND, Flickr Hive. Lixão. Disponível em: https://hiveminer.com/flickr_hvmnd.cgi?method=GET&sort=Interestingness&tag_mode=all&photo_type=250&search_domain=Tags&noform=t&textinput=lixao&photo_number=50&page=2&sorting=Interestingness&search_type=Tags&originput=lixao. Acesso em: 04 nov. 2018.

MONTGOMERY, Douglas C.; RUNGER, George C.. Estatística aplicada e probabilidade para engenheiros. 4. ed. Arizona: Ltc, 2009. 476 p.

NEVES, Fernando Luiz. EFEITO DA INTERAÇÃO ENTRE FIBRAS VIRGENS E RECICLADAS NAS CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DE CARTÕES MULTIFOLHADOS. 2000. 88 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Química, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2000.

TetraPak. RECICLAGEM PÓS-CONSUMO. 2010. Disponível em: <https://www.tetrapak.com/br/sustainability/recycling>. Acesso em: 14 set. 2018.

TetraPak. Material de embalagem das embalagens cartonadas TetraPak. 2018. Disponível em: <https://www.tetrapak.com/br/packaging/materials>. Acesso em: 13 set. 2018.

PARTNERS, Hx. Reciclagem de Embalagens Cartonadas. 2018. Disponível em: <http://www.hxpartners.com.br/site/category/novo/>. Acesso em: 16 set. 2018.

REVISTAOE. Fibra de carbono é opção para reforço estrutural. 2018. Disponível em: <https://revistaoe.com.br/fibra-de-carbono/>. Acesso em: 31 ago. 2020.

REVITA. Sustentabilidade. 2019. Disponível em: <https://revita.ind.br/a-empresa/>. Acesso em: 06 abr. 2019.

RODA, Daniel Tietz. Polietileno (pe). 2010. Disponível em: <https://www.tudosobreplasticos.com/materiais/polietileno.asp>. Acesso em: 28 ago. 2020.

SHOCKMETAIS. Tabelas de medidas, pesos e informações técnicas. 2019. Disponível em: <https://shockmetais.com.br/tabelas/aluminio/plig>. Acesso em: 13 ago. 2020.

WASILKOSKI, Cleuza Maria. Caracterização do polietileno de baixa densidade: técnica de análise dinâmica. 2002. 117 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2002.

APÊNDICE A – DIMENSÕES DOS CORPOS DE PROVA

Tabela 9 – Dimensões obtidas dos corpos de prova para os oito corpos de prova oriundos das quatro placas compósitas formadas por polietileno e alumínio.

Grupo	CP	Comprimento	Largura	Espessura ponto 1	Espessura ponto 2	Espessura ponto 3	Espessura média
A	1	250,00	25,00	4,16	4,33	4,81	4,43
A	2	250,00	25,00	3,82	3,94	3,81	3,86
A	3	250,00	25,00	3,67	3,93	3,75	3,78
A	4	250,00	25,00	3,85	3,89	3,82	3,85
A	5	250,00	25,00	3,62	3,84	3,65	3,70
A	6	250,00	25,00	4,08	3,67	3,92	3,89
A	7	250,00	25,00	3,45	3,71	3,48	3,55
A	8	250,00	25,00	4,03	4,52	3,51	4,02
B	1	250,00	25,00	6,92	6,58	8,25	7,25
B	2	250,00	25,00	7,34	7,47	8,2	7,67
B	3	250,00	25,00	6,52	6,76	7,85	7,04
B	4	250,00	25,00	6,42	7,17	7,8	7,13
B	5	250,00	25,00	6,76	7,38	7,71	7,28
B	6	250,00	25,00	6,92	6,98	7,29	7,06
B	7	250,00	25,00	6,76	7,18	7,63	7,19
B	8	250,00	25,00	6,5	7,87	7,61	7,33
C	1	250,00	25,00	11,69	12,7	12,04	12,14
C	2	250,00	25,00	11,75	12,01	11,84	11,87
C	3	250,00	25,00	11,57	12,07	11,17	11,60
C	4	250,00	25,00	11,67	12,07	11,81	11,85
C	5	250,00	25,00	11,92	12,13	11,71	11,92
C	6	250,00	25,00	11,78	12,13	11,96	11,96
C	7	250,00	25,00	11,99	12,41	11,94	12,11
C	8	250,00	25,00	11,98	12,33	12,18	12,16
D	1	250,00	25,00	9,75	9,12	8,44	9,10
D	2	250,00	25,00	10,04	9,45	8,66	9,38
D	3	250,00	25,00	9,52	9,37	9,66	9,52
D	4	250,00	25,00	8,9	9,97	9,81	9,56
D	5	250,00	25,00	8,8	9,9	10,07	9,59
D	6	250,00	25,00	9,09	10,06	9,88	9,68
D	7	250,00	25,00	8,5	9,69	9,9	9,36
D	8	250,00	25,00	9,77	9,14	10,16	9,69

Fonte: Autor (2020).