

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO RIO  
GRANDE DO SUL

CEZAR DE MATTOS

**DESENVOLVIMENTO E AVALIAÇÃO DE MATERIAL COMPÓSITO DE PVC  
REFORÇADO COM PÓ DE MADEIRA PARA APLICAÇÃO EM CARROCERIAS.**

Farroupilha

2019

CEZAR DE MATTOS

**DESENVOLVIMENTO DE MATERIAL COMPÓSITO DE PVC REFORÇADO  
COM PÓ DE MADEIRA PARA APLICAÇÃO EM CARROCERIAS.**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Tecnologia e Engenharia de Materiais para obtenção do grau de Mestre Profissional em Tecnologia e Engenharia de Materiais.

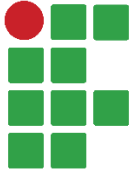

Área de Concentração: Tecnologia e Engenharia de Materiais

Linha de Pesquisa: Desenvolvimento de Materiais de Engenharia.

Orientador: Edson Luís Francisquetti

FARROUPILHA

2019

	Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Sul.	
	Programa de Pós-Graduação em Tecnologia e Engenharia de Materiais.	

Dissertação intitulada: Desenvolvimento de material compósito de PVC reforçado com pó de madeira para aplicação em carrocerias, de autoria de Cezar de Mattos, aprovada pela banca examinadora constituída pelos seguintes membros:

---

Prof(a). Dr(a). Ana Maria Coulon Grisa  
Universidade de Caxias do Sul

---

Prof. Dr. Douglas Alexandre Simom  
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Sul

---

Prof. Dr. Alexandre Luiz Gasparim  
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Sul

---

Prof. Dr. Edson Luiz Francisquetti - Orientador  
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Sul

---

Prof. Douglas Simom  
Coordenador do PPG-TEM

Data de aprovação: 04, de julho de 2019.

Avenida São Vicente, 785 | Bairro Cinquentenário | CEP: 95180-000 |  
Farroupilha/RS

Dedico este trabalho à minha família, à  
minha esposa Simone, minhas filhas Laura  
e Martina e aos meus amigos.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço primeiramente a Deus, que sempre me iluminou e guiou pelos melhores caminhos.

Aos meus pais, Fioravante e Romilda, pela paciência, suporte e carinho, pelo exemplo de força, honestidade e coragem.

A minha esposa Simone e minhas filhas Laura e Martina, pela compreensão, companheirismo, carinho, amor e pelo apoio constante na busca deste sonho.

Aos meus amigos queridos, que sempre estiveram prontos para ouvir, compartilhar e animar todos os momentos.

Aos meus professores por toda experiência e conhecimento transmitidos, em especial ao professor Edson Luiz Francisquetti, por ter me dado todo o suporte necessário e pelo direcionamento neste trabalho.

A empresa Perfiltec Indústria de Perfis, principalmente ao Sr. Loreci, pela parceria e confiança no meu trabalho.

A empresa Recrusul S.A., principalmente a todos os colegas que de uma forma ou outra me auxiliaram e apoiaram no desenvolvimento desse trabalho.

Ao Instituto Federal do Rio Grande do Sul (IFRS), pela oportunidade de aprendizado, crescimento profissional e pessoal adquiridos ao longo do programa.

## RESUMO

Compósitos de matriz polimérica reforçados com pó de madeira podem ser uma alternativa viável para substituir compensado naval aplicado em carroceria de semirreboques. O objetivo deste trabalho foi desenvolver compósitos de policloreto de vinila (PVC) reforçados com pó de madeira de *Medium Density Fiberboard* (MDF) e *Medium Density Particleboard* (MDP), avaliando propriedades físicas, mecânicas e morfológicas e comparando-as ao compensado naval. Análise de custo da troca do material também foi realizada. Os compósitos foram preparados em três amostras diferentes variando a fração mássica de pó de madeira e composto de PVC, sendo elas: 83% de composto de PVC e 17% de pó de madeira, 77% de composto de PVC e 23% de pó de madeira e 71% de composto de PVC e 29% de pó de madeira. Para caracterização dos compósitos foram utilizadas as normas ASTM D790:2003, ASTM D256:2002, ABNT NBR 9486:2011 e ASTM D792:2008. Análises de microscopia ótica dos compósitos e granulométrica do pó de madeira também foram realizadas. Nos parâmetros analisados foi possível perceber a viabilidade da utilização do compósito para substituição do compensado naval, que fica interessante quando realizada a viabilidade econômica do projeto.

**Palavras-chave:** PVC. Pó de Madeira. Compósitos Poliméricos.

## **ABSTRACT**

Wood-particle reinforced polymer matrix composites can be a viable alternative to replacing naval plywood applied to semi-trailer bodies. The objective of this research was to develop wood particle reinforced vinyl chloride (PVC) composites from Medium Density Fiberboard (MDF) and Medium Density Particleboard (MDP), evaluating physical, mechanical and morphological properties and comparing them to naval plywood. Cost analysis of material exchange was also performed. The composites were prepared in three different samples varying the mass fraction of wood particles and PVC compound, namely: 83% of PVC compound and 17% of wood particles, 77% of PVC compound and 23% of wood particles and 71% PVC composite and 29% wood particles. For the characterization of the composites, the standards ASTM D790: 2003, ASTM D256: 2002, ABNT NBR 9486: 2011 and ASTM D792: 2008 were used. Optical microscopy and particle size analysis were also performed. In the analyzed parameters it was possible to realize the feasibility of using the composite to replace the naval plywood, which is interesting when realized the economic viability of the project.

**Keywords:** Poly (vinyl chloride). Wood particles. Polymer Composites.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Materiais que compõem o semirreboque graneleiro.....	14
Figura 2 - Tampa Lateral .....	15
Figura 3 – Divisão dos materiais compósitos .....	16
Figura 4 – Compensado Multilaminado Palmasola .....	17
Figura 5 – Fluxograma de produção das amostras de material compósito.....	26
Figura 6 – Processo de fabricação das amostras .....	27
Figura 7 – Máquina de Ensaio de Tração/Compressão .....	30
Figura 8 – Máquina ensaio de Impacto Izod .....	31
Figura 9 – Estereomicroscópio Leica S6D .....	31
Figura 10 – Agitador de peneiras eletromagnético .....	34
Figura 11 – Gráfico de Distribuição do PMV X tamanho de partícula.....	36
Figura 12 – Gráfico da concentração de partículas grandes X pequenas no PMV .....	36
Figura 13 - Gráfico comparativo do módulo de elasticidade entre as amostras.....	39
Figura 14 - Gráfico comparativo da resistência a flexão das amostras.....	40
Figura 15 - Gráfico comparativo de resistência ao impacto Izod das amostras.....	41
Figura 16 – Gráfico comparativo da densidade das amostras.....	44
Figura 17 – Gráfico comparativo de absorção de água das amostras.....	46



## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Relação de nomes e fornecedores da materia prima utilizada na fabricação dos compósitos.....	25
Tabela 2 – Relação de nome e fornecedores do material utilizado nas tampas atualmente .....	26
Tabela 3 – Componentes da formulação de cada amostra do material compósito.....	28
Tabela 4 - Classificação das partículas de PMV .....	35
Tabela 5 – Densidade aparente do PMV .....	37
Tabela 6 - Resultados dos ensaios de flexão estática.....	37
Tabela 7 - Resultados do ensaio de impacto Izod.....	40
Tabela 8 - Imagens da microscopia das amostras de material compósito.....	42
Tabela 9 - Resultados dos ensaios de densidade.....	43
Tabela 10 - Resultados dos ensaios de absorção de água.....	45
Tabela 11 – Resultados da análise comparativa da massa.....	47
Tabela 12 – Resultados da análise do custo de troca do material .....	48

## LISTA DE ABREVIATURAS

ABIMCI	Associação Brasileira da Indústria de Madeira Processada Mecanicamente
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AGDI	Agência Gaúcha de Desenvolvimento e Promoção do Investimento
ANFIR	Associação Nacional de Fabricantes de Implementos Rodoviários
ASTM	Sociedade Americana de Testes e Materiais
CNT	Confederação Nacional do Transporte
CO <sub>2</sub>	Dióxido de Carbono
DOP	Ftalato de dioctilo
E	Módulo de Elasticidade
EN	Norma Européia
ISO	Organização Internacional para Padronização
MDF	Medium Density Fiberboard
MDP	Medium Density Particleboard
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
NBR	Norma Brasileira
PVC	Policloreto de Vinila
PU	Poliuretano
PMV	Pó de madeira vegetal
$\sigma$ máx	Tensão Máxima

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>10</b>
1.1 JUSTIFICATIVA E PROBLEMA .....	11
1.2 OBJETIVOS .....	12
1.2.1 Objetivo geral .....	12
1.2.2 Objetivos específicos.....	12
<b>2 REVISÃO DA LITERATURA .....</b>	<b>14</b>
2.1 SEMIRREBOQUE GRANELEIRO.....	14
2.2 MATERIAIS COMPÓSITOS.....	15
2.3 PAINEL COMPENSADO.....	16
2.4 COMPÓSITOS DE MATRIZ POLIMÉRICA REFORÇADOS COM CARGA VEGETAL.....	18
<b>2.5 PROCESSO DE EXTRUSÃO .....</b>	<b>23</b>
<b>3 MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>	<b>24</b>
3.1 MATÉRIAS .....	24
3.2 MÉTODOS .....	26
3.2.1 DESENVOLVIMENTO DAS FORMULAÇÕES E OBTENÇÃO DOS COMPÓSITOS DE PVC .....	26
3.3 AMOSTRAS .....	27
3.4 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS .....	29
3.5.1 Teste de Flexão Estática .....	29
3.5.2 Teste de Impacto Izod .....	30
3.5.3 Microscopia Óptica .....	31
3.5.4 Ensaio de Absorção de Água .....	32
3.5.5 Determinação da Densidade .....	32
3.5.6 Classificação granulométrica do pó de madeira vegetal .....	33
3.6 ANÁLISE COMPARATIVA DA MASSA.....	34

3.7 ANÁLISE DO CUSTO DA TROCA DE MATERIAL .....	34
4.1 CARACTERIZAÇÃO DO PMV .....	35
4.1.1 Dimensões das partículas de PMV .....	35
4.1.2 Determinação da densidade aparente do PMV .....	37
4.2 ENSAIO DE FLEXÃO ESTÁTICA .....	37
4.2 ENSAIO DE IMPACTO IZOD .....	40
4.3 DETERMINAÇÃO DA DENSIDADE .....	43
4.4 ABSORÇÃO DE ÁGUA .....	45
4.6 ANÁLISE COMPARATIVA DA MASSA DA CAIXA DE CARGA .....	47
4.7 ANÁLISE DE CUSTO .....	48
5.1 CONTRIBUIÇÃO DO TRABALHO .....	50
5.2 POSSIBILIDADES DE TRABALHOS FUTUROS .....	50
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>52</b>
<b>ANEXO A – IMAGEM DO MODELO EM 3D DOS PROTÓTIPOS DAS TAMPAS .....</b>	<b>56</b>

## 1 INTRODUÇÃO

O Brasil possui uma matriz de transporte altamente concentrada no modal rodoviário. Cerca de 60% das cargas brasileiras são transportadas por implementos rodoviários (CNT, 2015). Segundo dados de emplacamento, no primeiro trimestre de 2019 foram fabricados no Brasil 13.969 reboques e semirreboques, sendo que 3.848 são do tipo graneleiro (ANFIR, 2019).

Os grãos normalmente são movimentados a granel para as indústrias de esmagamento ou para silos de armazenagem. Esta movimentação é feita por transportadores rodoviários que utilizam-se de semirreboques com capacidade de carga líquida entre 27 e 50 toneladas (CNT, 2015).

Existem alguns modelos de semirreboques destinados ao transporte de grãos, o mais utilizado é o semirreboque graneleiro com tampas laterais articuláveis, Figura 1. O semirreboque graneleiro foi desenvolvido principalmente para o transporte de grãos (soja, trigo, milho, arroz e outros), mas também pode ser utilizado para o transporte de outros produtos, tais como: caixas, sacos e *pallets* na entressafra (CASTILHOS, 2011).

A matéria-prima principal para fabricação de implementos rodoviários é o aço, mas, aos poucos, esse material está deixando de ser utilizado. Para diminuir massa e manter a resistência necessária, a indústria nacional, optou pela utilização do compensado naval e em alguns pontos são utilizados polímeros (ANFIR, 2016). O uso do compensado naval tem certas restrições, sendo que a principal é a sua baixa vida útil, cerca de dois anos, o qual está associado a absorção de umidade, em virtude de acelerar o processo de decomposição da madeira. Sartori (2007), destaca que a busca por materiais alternativos deve ter como objetivo a redução de massa e o aumento da vida útil dos semirreboques e se possível diminuir as paradas para manutenção.

Almejando competitividade através da redução de massa dos implementos, aumento da vida útil e redução dos custos de seus processos, as fabricantes de implementos rodoviários vêm trabalhando fortemente para substituir materiais mais densos por materiais mais leves, mas que ofereçam desempenho igual ou superior aos materiais atuais. Neste âmbito, este trabalho buscou desenvolver um material

compósito com matriz a base de composto de policloreto de vinila reforçado com pó de madeira vegetal (PMV) como alternativa ao compensado naval aplicado em carrocerias de semirreboques graneleiros.

## 1.1 JUSTIFICATIVA E PROBLEMA

Assim como no mercado automobilístico, a competitividade no ramo de implementos rodoviários é bastante acirrada. Buscar o equilíbrio entre inovação, qualidade, custos reduzidos e consciência ambiental é fundamental para competir por um maior espaço nas vendas.

A busca por redução da massa dos componentes é uma das alternativas que contribui para que as implementadoras tornem-se mais competitivas no mercado. Um semirreboque mais leve representa aumento de carga líquida transportada e quando transita descarregado reduz o consumo de combustível. Aliado a isso, também está o ciclo de vida do produto. Oferecer um produto de maior vida útil aos operadores logísticos deste segmento representa redução do custo com paradas para manutenção. Esses são argumentos ganhadores de pedidos na atualidade e que justificam o investimento dos frotistas. Para isso, o constante estudo de aplicação de materiais alternativos em implementos rodoviários é de grande importância para o desenvolvimento do setor.

Outro fator que nos últimos anos tem tornado-se um ponto de grande importância para as mais variadas indústrias, não podendo ser diferente para as fabricantes de implementos, é a questão socioambiental. A seleção dos materiais e seu processo de manufatura podem ter grande efeito em áreas como: depredação de recursos naturais, consumo de energia, poluição e rejeitos. Além de fatores que surgem e forçam a indústria a levar cada vez mais a sério a questão ambiental, tais como: legislações, redução no custo de manufatura e imagem da empresa. Neste contexto, procuram-se materiais que apresentem boa reciclabilidade, sejam de fácil desmontagem e que seu processo não gere subprodutos que agridam o meio ambiente e conseqüentemente atinjam a sociedade de forma negativa.

A utilização do compensado naval nas carrocerias dos semirreboques graneleiros, com vida útil de aproximadamente dois anos, só é viável com aplicação de um revestimento de látex a base de água chamado de pintura emborrachada. No entanto, este processo é complexo porque necessita de equipamentos específicos, como pistolas e bombas especiais, além do tempo de cura do revestimento, que é diferenciado. Neste cenário, o processo atual é um problema, porque demanda bastante tempo e custo.

Portanto, este trabalho visa quebrar as barreiras que ainda existem por aplicação de materiais alternativos nos produtos destinados ao transporte rodoviário de cargas a granel, trazendo inovação tecnológica e competitividade para a indústria de implementos com a substituição do compensado naval por um material alternativo. Além disso, também reforça o comprometimento com o meio ambiente na busca por materiais ecologicamente corretos, alternativos a madeira, refletindo de maneira positiva na sociedade.

## 1.2 OBJETIVOS

Este estudo propõe o desenvolvimento de um material compósito para aplicação alternativa ao painel de compensado naval em semirreboques graneleiros.

### 1.2.1 Objetivo geral

Desenvolver e avaliar um material compósito de matriz polimérica Policloreto de Vinila (PVC) reforçado com carga vegetal, pó de madeira vegetal (PMV) para substituir o painel de compensado naval utilizado em carroceria de semirreboques graneleiros.

### 1.2.2 Objetivos específicos

- a) caracterizar o material utilizado atualmente, o compensado naval;

- b) preparar compósitos com diferentes percentuais de PVC com adição de diferentes tipos e concentração de pó de madeira vegetal, comparando os mesmos ao compensado naval, em suas propriedades físicas, mecânicas e morfológicas;
- c) avaliar o efeito da incorporação do pó de madeira nas amostras de compósitos;
- d) avaliar a massa de uma carroceria de um semirreboque com comprimento de 12,5 metros;
- e) avaliar o custo da substituição do material.



## 2 REVISÃO DA LITERATURA

### 2.1 SEMIRREBOQUE GRANELEIRO

O semirreboque graneleiro, Figura 1, é composto basicamente por uma estrutura em aço denominado chassi e pela carroceria que é composta por tampas laterais e traseiras articuladas, formadas por estrutura de perfis em aço revestida com chapa de compensado naval com 12 mm de espessura, sendo esta fixada na estrutura através de parafusos, Figura 2. Antes da montagem na estrutura, a chapa de compensado passa por um processo de pintura denominada emborrachada de tinta latex à base de água (SARTORI, 2007; CASTILHOS, 2011).

Figura 1 – Materiais que compõem o semirreboque graneleiro



	Aço – 79,7%		Polímero – 1,7%
	Madeira – 18,4%		Alumínio – 0,2%

Fonte: Autor (2019)

A parte frontal da carroceria é fabricada em aço estrutural e o assoalho pode ser constituído de lâminas de compensado naval, madeira de lei ou chapa de aço. Para a integridade da carroceria existem correntes internas que ligam as tampas laterais visando reduzir o estufamento quando o implemento estiver carregado. Ao longo do assoalho existem pontos de abertura para a descarga dos grãos chamados bocal de escoamento. Para evitar o vazamento dos grãos, as tampas laterais e traseiras possuem vedações nas extremidades. A carroceria conta também com arcos

para acomodação da lona de proteção da carga contra intempéries (CASTILHOS, 2011).

Figura 2 - Tampa Lateral



Fonte: CASTILHOS (2011)

## 2.2 MATERIAIS COMPÓSITOS

Materiais compósitos são compostos de dois ou mais materiais com objetivo de obter uma combinação de propriedades, o que não pode ser exibido por um único material. Existe um grande número de compósitos que são representados por combinações de metais, polímeros e cerâmicos. Além destes, existem os materiais compósitos naturais, como por exemplo, a madeira e o osso (SCHACKELFORD, 2008; CALLISTER, 2012).

Segundo Carneiro (2008), a estrutura dos materiais compósitos é constituída por uma combinação de dois ou mais produtos não solúveis entre si. Um dos seus produtos é chamado de fase de reforço e outro de matriz. A matriz envolve o reforço, podendo ter em sua composição adições, tais como aditivos e materiais de enchimento, que modificam suas propriedades. Concreto, madeira e osso humano são alguns tipos de compósitos.

Os materiais compósitos são divididos em três tipos: compósitos reforçados com partículas, reforçados com fibras e estruturais. Também existem pelo menos 02 subdivisões para cada um, conforme Figura 3 (CALLISTER, 2012).

Figura 3 – Divisão dos materiais compósitos



Fonte: CALLISTER (2012)

### 2.3 PAINEL COMPENSADO

Conforme Callister (2012), o painel compensado é um material compósito laminado composto por lâminas ou painéis bidimensionais que possuem uma direção preferencial de alta resistência. As camadas são emplilhadas e unidas umas as outras, de modo que a orientação da direção de alta resistência varie de acordo com a camada sucessiva.

Para Bortoletto Júnior, Garcia (2004) e Mattos *et al.* (2008), o compensado é formado através da colagem de lâminas de madeira com resinas fenólicas ou úreia/formaldeído, geralmente em número ímpar, sobrepostas com a direção das fibras das camadas sucessivas formando ângulos retos entre si. Os compensados abrangem os seguintes tipos:

- a) multilaminado: lâminas de madeira sobrepostas em número ímpar de camadas coladas transversalmente;

- b) sarrafeado ou *blockboard*: tem o miolo composto de sarrafos e as capas com lâminas de madeira. Conta com camadas de transição compostas de lâminas coladas perpendicularmente aos sarrafos e às capas;
- c) *three-ply* ou compensado de madeira maciça: constituído de três camadas cruzadas de sarrafos colados lateralmente.

No Brasil, empregam-se como matéria-prima de compensados madeira advinda de florestas plantadas, especialmente *Pínus*, e também as provenientes de florestas nativas de folhosas – o compensado tropical.

O compensado tem inúmeras aplicações no segmento industrial, seja na indústria moveleira ou na indústria metalúrgica. Na metalúrgica, é aplicado para diversos fins, desde a fabricação de embalagens até a fabricação de componentes que passam a fazer parte dos produtos manufaturados. Dentro do segmento de transporte, mais especificamente no transporte de grãos, o mesmo tem uma destacada aplicação na utilização em caixas de carga de semirreboques graneleiro (SARTORI, 2007).

O compensado aplicado em semirreboques é do tipo multilaminado conforme ilustrado na Figura 4. Segundo Palmasola (2018), esse material é composto por capas (lâminas externas) de madeira dura e miolo (lâminas internas) de madeira dura e *Pínus* reflorestado colado com resina fenólica.

Figura 4 – Compensado Multilaminado Palmasola



Fonte: PALMASOLA (2018)

De acordo com a ABIMCI (2014) e Silva *et al.* (2012), os painéis de madeira compensada colados com resina fenólica apresentam valores de módulo de elasticidade (E) perpendicular as fibras entre 1.8 GPa e 4.1 GPa, densidade de 0,476 a 0,641 g/m<sup>3</sup>, absorção de água de 56,2% após 2 horas, e 63,8% após 24 horas.

## 2.4 COMPÓSITOS DE MATRIZ POLIMÉRICA REFORÇADOS COM CARGA VEGETAL

O desempenho estrutural dos compósitos sintéticos, em muitos aspectos, ainda supera o dos compósitos naturais. No entanto, com a crescente necessidade de se resguardar o meio ambiente das inúmeras agressões oriundas dos processos industriais, bem como minimizar a dependência de recursos não-renováveis como o petróleo, e assim efetivamente promover o desenvolvimento sustentável, o uso de matérias-primas de origem vegetal, e portanto renováveis, vem crescendo nos últimos anos (LEVY NETO, 2006).

Rodolfo e Vanderley (2006), desenvolveram um compósito de policloreto de vinila (PVC) reforçado com uma mistura de resíduos de *Pinus Elliotti* e *Pinus Taeda* para substituir madeira convencional em diversas aplicações. Conforme destaca o autor, o PVC possui vantagens em relação ao polipropileno (PP) e ao polietileno (PE) em três aspectos principais: maior módulo de elasticidade, baixa flamabilidade, possibilidade de pintura e também pode ser processado a baixas temperaturas quando comparado ao PP, minimizando a queima do *Pinus* dentro na máquina.

Foram testadas amostras com resíduos de *Pinus* de dois tamanhos médios de partículas e de diferentes teores, variando de 10 a 60% de concentração mássica. 80% das partículas foram retiradas em malha 60 mesh ou 0,250 mm identificadas por M04C, ou seja, partículas grosseiras. 95% das partículas foram retiradas em malha 100 mesh ou 0,149 mm identificadas por M10045, ou seja, partículas bastante finas.

O resíduo de madeira foi seco e durante a secagem foram incorporados lubrificantes funcionais e demais agentes de tratamento superficial das partículas visando a redução da tendência de reabsorção de umidade. Foram adotadas duas técnicas de tratamento superficial das partículas. Uma com 1,5 % em massa de Struktol TPW0012, lubrificante funcional recomendado especificamente para

compósitos de termoplásticos com madeira, e outra com uma mistura de lubrificantes funcionais e agentes de acoplamento, sendo 1,5 em massa de Struktol TPW0012 e 1% em massa de organotitanato Lica 38 (Tri(dioctil) Pitofosfato tinanato).

Foram realizados ensaios mecânicos de flexão, impacto Charpy e ensaios térmicos conduzidos em um reômetro de torque para avaliar os efeitos da incorporação do reforço à processabilidade do PVC e também realizou-se ensaio de microscopia eletrônica de varredura (MEV). A preparação dos corpos de prova para a caracterização obteve-se através da plastificação das formulações em uma calandra de dois rolos, na temperatura de 190°C.

Nos ensaios constatou-se que o tratamento do reforço foi eficiente para diminuir teores de umidade para partículas de madeira em seu estado normal de fornecimento. Teores de umidade superiores a 7%, caíram para valores entre 1 e 2%, mostrando que os valores alcançados foram adequados ao processamento por extrusão. A presença de farinha de madeira interferiu na velocidade de processamento do material, uma vez que o processo de fusão de compostos de PVC depende do atrito interpartícula da resina polimérica, e o aumento da fração de carga no composto provoca afastamento crescente das partículas de resina de PVC.

A resistência ao impacto Charpy foi reduzida pela presença do reforço de madeira. A formulação com reforço de maior tamanho médio de partícula apresentou resultados superiores de resistência ao impacto devido a maior continuidade da matriz dúctil de PVC. Através da análise de micrografia, nos corpos de prova fraturados no ensaio de charpy, observa-se que o reforço comporta-se como carga de enchimento, ao invés de fibra de reforço, uma vez que não observam-se partículas fraturadas, mas sim arrancadas da matriz de PVC. É possível observar os vazios deixados na matriz de PVC pelo arrancamento das partículas de sua posição original no momento da fratura, concluindo-se que o tratamento com o agente de acoplamento selecionado não foi eficiente no aspecto adesão matriz/reforço.

O comportamento do módulo de elasticidade sob flexão aumentou em função da incorporação de frações mássicas do reforço até um limite de 50%. Para o reforço em ambos os tipos de tratamento e fração mássica de 60%, verificou-se que o módulo de elasticidade na flexão reduziu, reforçando a suspeita de excesso de partículas e falta de adesão entre matriz e reforço.

Jeamtrakull *et al.* (2012), analisaram as propriedades mecânicas e comportamento de desgaste de compósitos de madeira e PVC, utilizando três tipos diferentes de farinha de madeira, com e sem a adição de fibras de vidro cortadas em pedaços. Essas partículas de farinha de madeira e a fibra de vidro foram misturadas a seco e moldadas por compressão para formar folhas compósitas de madeira e PVC.

As propriedades mecânicas dos compósitos foram analisadas por meio de ensaios de flexão, dureza Shore D e desgaste. Os valores de dureza dos compósitos com os três tipos de farinha de madeira ficaram muito semelhantes. Verificou-se também que o aumento do teor de madeira tende a aumentar a dureza e a resistência à flexão. A resistência à flexão aumentou até um teor de madeira de 40%, acima disso essa propriedade tende a diminuir.

O aumento das propriedades de flexão até uma determinada proporção indicou que a matriz de PVC foi reforçada pelas partículas de madeira, enquanto que a diminuição das propriedades de flexão provavelmente resultou da dificuldade em dispersar as partículas de madeira ao redor da matriz de PVC devido ao alto teor de madeira. Com relação a comparação das propriedades de flexão dos três tipos de madeira, observa-se que o nível de porosidade de uma das madeiras, ajudou no ganho de resistência a flexão, uma vez que o PVC penetrou no corpo da partícula durante o processamento causando um intertravamento físico.

A adição de partículas de madeira na matriz de PVC aumentou a resistência ao desgaste do compósito, indicando o reforço de madeira na matriz de PVC. Isso mostra uma coerência com os resultados de dureza e propriedades de flexão. O aumento da resistência ao desgaste dos compósitos pela adição de madeira foi devido ao fato de as partículas de madeira serem mais rígidas do que o PVC. A adição de fibra de vidro nos compósitos com os três diferentes tipos de partículas de madeira, melhorou as propriedades de resistência a flexão e resistência ao desgaste. No entanto a dureza pouco mudou.

Matuana *et al.* (1998) investigaram os efeitos da estrutura microcelular desenvolvida em compostos de PVC/madeira-fibra sobre as propriedades mecânicas e físicas, uma vez que uma estrutura microcelular de espuma reduz o peso e melhora a resistência ao impacto.

Como reforço utilizou-se um tipo comercial de fibra de madeira comercial. O comprimento e diâmetro das fibras estavam na gama de 30-40  $\mu\text{m}$  e 0,3-1,0  $\mu\text{m}$ . Gama-aminopropiltriétoxissilano (União Carbide Corporation, A-1 100) e ftalato de dioctilo (DOP) foram utilizados como agente de acoplamento e plastificante, respectivamente, e como agente espumante utilizou-se o gás  $\text{CO}_2$ . As amostras foram processadas da seguinte forma: primeiramente, os compósitos com fibras tratadas e sem tratamento foram homogeneizados em misturador. Após, foram moldados em painéis por meio de processo de compressão a quente. Na sequência, as amostras foram espumadas microcelularmente. A morfologia celular das amostras espumadas foi caracterizada por análise de MEV. Realizaram-se ensaios de tração e impacto nos compostos de espuma para investigar a dependência destas propriedades na morfologia celular dos compósitos espumados.

Os ensaios mostraram que a adição de espuma no material compósito reduziu o peso e aumentou significativamente a resistência ao impacto, porém a resistência a tração foi reduzida. A resistência à tração diminuiu à medida que a fração vazia aumentou. Os compósitos espumados com fibras não tratadas apresentaram rigidez dispersa significativa devido a não uniformidade de fibras de madeira na matriz durante a mistura. Nas amostras em que o agente de acoplamento não foi utilizado, as fibras aglomeraram-se devido as fortes interações entre elas provenientes da ligação de hidrogênio. Essa não uniformidade das fibras de madeira na matriz implicou na uniformidade das estruturas de espuma desenvolvidas.

El-Shekeil *et al.* (2014), analisaram a influência do teor de fibras nas características mecânicas de compostos de PVC com PU reforçados com fibras de Kenaf, uma planta nativa da Ásia do Sul. Os compósitos foram preparados com teores de fibras de 20, 30 e 40% em peso. Após a mistura o compósito foi comprimido utilizando uma máquina de moldagem por compressão. Foram estudadas propriedades mecânicas de tração e impacto Izod.

Com o aumento do teor de fibras, a resistência à tração e ao impacto reduziram. O aumento no teor de fibras causa falta de absorção do impacto devido a redução do teor do composto de PVC com PU que possui melhor propriedades de resistência ao impacto.



Nas análises de microscopia realizadas nos corpos de prova fraturados observou-se a descolagem de fibras e presença de vazios entre fibra e matriz. Isso evidencia a fraca aderência da fibra com a matriz e confirma os resultados obtidos nos ensaios mecânicos. Conforme aumentou o teor de fibras, aumentou o número de pontos de falhas e de tensão.

Conforme Rowell *et al* (1997), as principais vantagens de usar fibras lignocelulósicas como reforços em plásticos são: as baixas densidades, não serem abrasivos para a mistura e para os equipamentos de processamento, altos níveis de preenchimento possíveis resultando em propriedades de alta rigidez, facilmente recicláveis, biodegradáveis, grande variedade de fibras disponíveis no mundo todo, baixo consumo de energia e baixo custo.

Como desvantagem o autor cita a temperatura de processamento que são limitadas a cerca de 200°C devido a possibilidade de degradação lignocelulósica e a possibilidade de emissões voláteis que podem afetar propriedades compostas. Isso limita o tipo de termoplásticos que podem ser usados na fabricação dos compósitos. Outra desvantagem é a alta absorção de umidade das fibras naturais. A absorção de umidade pode resultar na instabilidade de dimensões dos compósitos de fibra. Essa absorção é minimizada no compósito devido ao encapsulamento pelo polímero, mas é difícil eliminar totalmente a absorção de umidade sem aplicar barreiras na superfície do compósito. Uma boa ligação entre matriz e fibra também diminui a taxa de absorção de umidade pelo compósito.

Os processos de produção de compósitos a base de partículas de madeira e termoplásticos podem ser, basicamente, por termoprensagem ou por extrusão. Resumidamente o processo de termoprensagem é a produção de painéis com pressão e temperatura. Nesse processo os produtos obtidos são painéis com diferentes espessuras e tamanhos, que dependem exclusivamente da capacidade e dimensionamento da máquina. O processo de extrusão é o mais utilizado na fabricação do compósito de PVC com pó de madeira, pois se obtém uma massa fundida e homogênea, o que garante uma distribuição da fase dispersa na matriz.

## 2.5 PROCESSO DE EXTRUSÃO

O processo de extrusão consiste na moldagem de um termoplástico viscoso sob pressão por meio de uma matriz com extremidade aberta, de maneira semelhante à extrusão de metais. Uma rosca ou parafuso sem fim transporta o material através de uma câmara, onde ele é sucessivamente compactado, fundido e conformado como uma carga contínua de um fluido viscoso. A extrusão ocorre conforme essa massa fundida é forçada através de um orifício na matriz. A solidificação do segmento extrudado é acelerada por sopradores de ar, por um borrifo de água ou por um banho (CALLISTER, 2012).

Conforme Correa *et al* (2003), alguns aspectos devem ser observados no processamento de termoplásticos com pó de madeira. A umidade e a granulometria devem ser rigidamente controladas e zonas de degasagem devem ser utilizadas para remoção da umidade residual durante o processamento. A baixa temperatura de degradação da celulose na faixa de 200 a 220 °C constitui um fator limitante do processo, exceto quando os tempos de residência são minimizados. A exposição do resíduo de madeira a temperaturas acima dessa faixa libera voláteis, provoca descoloração, aparecimento de odor e a fragilização do compósito.

Os processos de manufatura utilizados para preparação de compósitos celulósicos termoplásticos são processos do tipo batelada em misturador intensivo ou processo contínuo em extrusora de dupla rosca. Em ambos os casos o compósito obtido pode ser granulado e processado em extrusora de rosca única para obtenção de perfis e chapas laminadas. Com base nessas peculiaridades, existe uma grande discussão entre os maiores fabricantes de equipamentos sobre a melhor configuração de máquina para processamento de compósitos termoplásticos com madeira. Estes equipamentos podem ser classificados em quatro categorias distintas.

a) Madeira pré-secada; mistura pré-homogeneizada: Nesse processo são utilizados equipamentos no qual a fibra de madeira é submetida a processos de pré-secagem em níveis de umidade inferiores a 1% e alimentada em uma extrusora rosca-dupla contra-rotacional juntamente com o polímero, normalmente na forma de pó. A mistura polímero-madeira e aditivos é preparada em misturadores intensivos antes de ser

alimentada na extrusora. Esse sistema é muito utilizado para processamento de termoplásticos com baixa estabilidade térmica como o PVC.

b) Madeira pré-secada; alimentação polímero-madeira em separado: Nesse processo a resina e a fibra são alimentadas em separado propiciando um melhor controle do tempo de residência da carga celulósica durante o processamento. São normalmente utilizadas extrusoras de rosca-dupla de grande capacidade, com portos laterais de alimentação, onde a fibra é misturada ao polímero fundido, passando por zonas de mistura distributiva e desgaseificação da umidade residual.

c) Madeira úmida primeiro; alimentação do polímero fundido: Nesse processo são necessárias duas extrusoras que operam simultaneamente; uma extrusora primária secando a farinha de madeira e uma outra menor plastificando o polímero e os aditivos.

d) Madeira úmida primeiro; alimentação em separado: Nesse processo a farinha de madeira pode ser alimentada ainda úmida na zona de alimentação e a mistura de resina e aditivos introduzida posteriormente no barril através de um alimentador lateral. Todavia esse processo requer normalmente equipamentos com barris muito longos (L/D 44 ou 48:1) e com zonas de desgaseificação próximas a zona de alimentação para remoção da umidade da madeira, o que nem sempre é possível.

Dessa forma, a alternativa mais segura ainda tem sido a utilização de madeira pré-secada adquirida junto aos fornecedores de farinha de madeira. Com relação aos parâmetros da máquina, geralmente utiliza-se temperaturas ao longo do canhão variando de 170 a 190 °C e velocidade de rotação de rosca de 60 a 100 rpm.

### **3 MATERIAIS E MÉTODOS**

#### **3.1 MATÉRIAS**

Para obtenção do composto foram utilizados o composto de PVC rígido como fase matriz, e resíduos industriais de pó de madeira *Medium Density Fiberboard* (MDF) e *Medium Density Particleboard* (MDP) como fase dispersa. Na Tabela 1, estão discriminados as matérias primas e os fornecedores das mesmas.

Tabela 1 – Relação de nomes e fornecedores da matéria prima utilizada na fabricação dos compósitos.

<b>Matéria-prima</b>	<b>Nome</b>	<b>Fornecedor</b>
Policloreto de Vinila (PVC)	SP/1000	Braskem
Stabilizante	Ca - Zn	Baerlocher
Pó de Madeira Vegetal (PMV)	<i>Medium Density Fiberboard (MDF) e Medium Density Particleboard (MDP)</i>	Indústrias Moveleiras da região
CACO <sub>3</sub>	Carbomil	Syntex
Óleo Plastificante	DOP (Dioctil Ftalato)	Basile Quimica
Regulador de Fluxo	Não declarado por motivo de patente	Kaneka
Modificador de Impacto	Não declarado por motivo de patente	Kaneka

Fonte: Autor (2019)

Conforme Braskem (2002), mesmo com toda a diversidade de formulações é possível considerar valores de referência de algumas propriedades físicas e mecânicas dos compostos de PVC. A densidade dos compostos de PVC gira em torno de 1,40 a 1,45 g/cm<sup>3</sup>, a resistência a flexão entre 62 a 100 MPa, resistência ao impacto entre 25 a 1500 J/m, modulo de elasticidade a flexão entre 2000 a 3000 MPa e absorção de água entre 0,07 a 0,40%.

As características pó de madeira vegetal serão descritos da etapa de caracterização por se tratar de um resíduo industrial.

Para comparação ao material compósito utilizou-se como referência o material utilizado atualmente. Na Tabela 2 estão descritos a matéria-prima e os fornecedores do material.

Tabela 2 – Relação de nome e fornecedores do material utilizado nas tampas atualmente

<b>Matéria-prima</b>	<b>Nome</b>	<b>Fornecedor</b>
Compensado naval	Compensado Naval	Palmasola
Revestimento	Emborrachado	Farbem

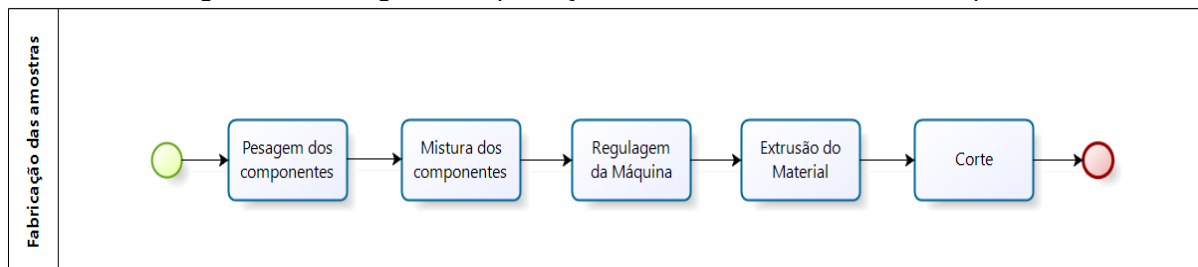
Fonte: Autor (2019)

## 3.2 MÉTODOS

### 3.2.1 Desenvolvimento das formulações e obtenção dos compósitos de PVC

Os compósitos de PVC com pó de madeira vegetal foram desenvolvidos pelo processo de extrusão na empresa Perfiltec Indústria de Perfis em Caxias do Sul – RS. A Figura 5 apresenta o fluxograma macro de produção dos compósitos.

Figura 5 – Fluxograma de produção das amostras de material compósito



Fonte: Autor (2019)

A pesagem das formulações conforme Tabela 3, ocorreu em uma balança da marca Balmak, modelo ELP – 10 com capacidade de 10 kg. Após, os componentes foram misturados em misturador quente/frio modelo WENZEL com capacidade de 1 m<sup>3</sup> durante um período de 40 minutos, em seguida pó de madeira foi adicionado ao composto, o qual permaneceu em mistura por mais 10 minutos. Após a mistura, o material foi processado em uma extrusora monorosca da marca MIDDLE TECH com diâmetro de rosca de 45mm e capacidade de produção de 1200kg/h com L/D = 28, Figura 6. Os parâmetros de processamento foram:

- a) perfil de temperatura variando de 110 a 190°C nas zonas de alimentação e 220°C na matriz;
- b) rotação de rosca em torno de 80rpm;
- c) temperatura da água do calibrador em torno de 4°C.

Figura 6 – Processo de fabricação das amostras



Fonte: Perfiltec (2019)

### 3.3 AMOSTRAS

As amostras de compensado naval foram escolhidas aleatoriamente na linha de produção da empresa Recrusul SA, sendo uma amostra revestida com tinta látex a base de água e outra sem revestimento.

A Tabela 3, apresenta as formulações dos materiais compósitos.

Tabela 3 – Componentes da formulação de cada amostra do material compósito

	<b>Componentes</b>	<b>Kg</b>	<b>PCR</b>	<b>Fração Mássica</b>
<b>Amostra 1</b>	Resina (PVC)	25	100	55%
	Stabilizante	1,2	5	3%
	MDF/MDP	7,59	30	17%
	CACO <sub>3</sub>	8	32	18%
	Plastificante	0,5	2	1%
	Regulador de Fluxo	0,25	1	0,5%
	Modificador de Impacto	3	12	7%
	<b>Componentes</b>	<b>Kg</b>	<b>PCR</b>	<b>Fração Mássica</b>
<b>Amostra 2</b>	Resina (PVC)	25	100	51%
	Stabilizante	1,2	5	2%
	MDF/MDP	11,39	46	23%
	CACO <sub>3</sub>	8	32	16%
	Plastificante	0,5	2	1%
	Regulador de Fluxo	0,25	1	0,5%
	Modificador de Impacto	3	12	6%
	<b>Componentes</b>	<b>Kg</b>	<b>PCR</b>	<b>Fração Mássica</b>
<b>Amostra 3</b>	Resina (PVC)	25	100	47%
	Stabilizante	1,2	4,8	2%
	MDF/MDP	15,18	61	29%
	CACO <sub>3</sub>	8	32	15%
	Plastificante	0,5	2	1%
	Regulador de Fluxo	0,25	1	0,5%
	Modificador de Impacto	3	12	6%

Fonte: Autor (2019)

### 3.4 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

A caracterização foi definida com base na aplicação dos materiais. No caso de um semirreboque graneleiro, o material utilizado nas tampas está sujeito a variadas ações como: impactos causados durante o carregamento de *palets* ou pelo transporte de peças soltas, umidade, flexão, temperatura, abrasão, entre outras. Dessa forma, foram realizados os ensaios a seguir.

#### 3.5.1 Teste de Flexão Estática

Os ensaios de flexão foram realizados conforme a norma ASTM D790:2003 adaptada. A norma define que para ensaios de flexão a três pontos, os corpos de prova com espessura maior que 1,6 mm retirado de chapa, a espessura deve ser a espessura do material, o intervalo entre suportes deve ser 16:1, ou seja, dezesseis vezes a espessura do material e a largura não deve exceder  $\frac{1}{4}$  do vão entre suportes. Os corpos de prova utilizados foram padronizados nas dimensões de 160 X 30 mm, sendo que a espessura foi a de cada material. Para o compensado a espessura variou entre 12 e 13 mm. Já o compósito, a espessura variou entre 17 e 19 mm. O intervalo entre suporte foi padronizado em 8:1, ou seja, oito vezes a espessura do material. Para cada tipo de material foram testados 05 corpos de prova. Os parâmetros de velocidade de deslocamento seguiram o estabelecido na norma.

Os ensaios foram realizados no laboratório de polímeros do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Sul (IFRS) Campus Caxias do Sul, em uma máquina universal de ensaios eletromecânica da marca Emic, Figura 7, com capacidade de 20 kN, dotada de sistema computadorizado para controle das variáveis do ensaio e coleta dos dados e cálculo dos resultados.



Figura 7 – Máquina de Ensaio de Tração/Compressão



Fonte: Autor (2019)

### 3.5.2 Teste de Impacto Izod

Os ensaios de impacto foram realizados conforme a norma ASTM D256:2002 adaptada. Para os materiais de chapas, a norma determina que os corpos de prova sejam recortados nas direções transversal e longitudinal, a menos que especificado de outra forma. A largura da amostra deve ser igual a espessura da chapa, se a chapa tiver entre 3 e 12,7 mm. Se a espessura for maior de 12,7 mm deve ser usinado até 12,7 mm. Quando a amostra é recortada de um chapa grossa, o entalhe deve ser feito na parte da espessura da chapa. Para o compensado naval, a espessura dos corpos de prova variou entre 12,2 e 12,25 mm e a largura entre 12,00 a 12,15 mm. Após testar um corpo de prova, optou-se por não fazer entalhe, devido a fragilidade percebida do material. Para as amostras de compósito, a espessura dos corpos de prova variou entre 17,2 a 18,7 mm a largura variou entre 14,75 a 17,05 mm. No entanto, por serem amostras vazadas, para o cálculo foi desconsiderando a seção vazia dos corpos de prova. Após testar um corpo de prova do material, foi necessário fazer entalhe por meio de 04 passes de serra manual, visto que sem este entalhe não ocorria rompimento dos corpos de prova. Para cada amostra foram feitos 05 corpos de prova.

Os ensaios foram realizados no laboratório de polímeros do IFRS Campus Farroupilha, em uma máquina de ensaio de impacto Izod da marca Zwick com martelo de até 4 Joule, Figura 8.

Figura 8 – Máquina ensaio de Impacto Izod



Fonte: Autor (2019)

### 3.5.3 Microscopia Óptica

O ensaio de microscopia óptica foi realizado nos corpos de prova rompidos pelo ensaio de impacto Izod. Foi realizada a análise da seção rompida em um estereomicroscópio S6D da marca *Leica Microsystems* com zoom de 6,3:1 dotado de um sistema computadorizado, Figura 9. Para captura das imagens utilizou-se o software *Leica Applications Suite (LAS EZ)*. O ensaio foi realizado no laboratório de ensaios mecânicos do IFRS Campos Farroupilha.

Figura 9 – Estereomicroscópio Leica S6D



Fonte: Autor (2019)

### 3.5.4 Ensaio de Absorção de Água

Os ensaios de absorção de água foram realizados conforme a norma ABNT NBR 9486:2011 adaptada. A norma define que devem ser recortados no mínimo 05 copos de prova nas dimensões de 75X25X9 mm das chapas. As bordas e superfícies devem ser lixadas por 24 horas sob temperatura constante de 50 °C ± 2°C. Deixar resfriar em dessecador, pesar e imergir totalmente em água destilada por 24 horas. Após retirar os corpos de prova, um de cada vez, enxugar a superfície com papel absorvente e repesá-los. O cálculo da porcentagem absorvida é realizado pela seguinte equação (1):

$$A = \frac{Mf - Mi}{Mi} \times 100 \quad (1)$$

Onde:

$A$  é a quantidade de água absorvida, expressa em (%);  $Mf$  é a massa final do corpo de prova expressa em (g);  $Mi$  é a massa inicial do corpo de prova expressa em (g).

Os corpos de prova dos compósitos foram recortados nas dimensões de 75X25 mm, sendo que a espessura variou conforme a espessura de cada chapa. Os corpos de prova foram pesados em uma balança da marca Marte com capacidade de 210 g, precisão de 0,001 g e colocados em estufa com temperatura controlada de 50 °C por 24 horas para eliminar possíveis quantidades de umidade residual. Após, os corpos de prova foram repesados e imergidos em água destilada, onde permaneceram por 24 horas. Na sequência, os corpos de prova foram retirados, um a um, secados em papel absorvente, novamente repesados e por fim calculado a quantidade de água absorvida. Os ensaios foram realizados no laboratório de polímeros do IFRS Campus Farroupilha.

### 3.5.5 Determinação da Densidade

A densidade foi determinada conforme a norma ASTM D792:2008 a qual determina que corpos de prova de até 50 gramas sejam pesados e após mergulhados

em recipiente com água destilada dotado de sistema para medir o volume de água deslocada. A densidade é obtida através da razão entre a massa e o volume do corpo de prova.

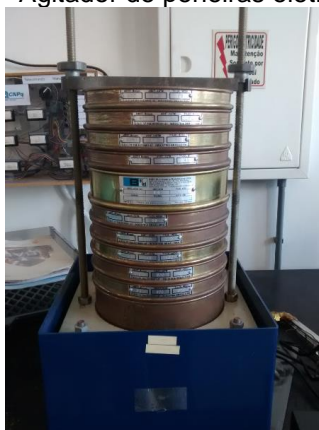
Os ensaios foram realizados no laboratório de polímeros do IFRS Campus Farroupilha e utilizando-se uma balança digital da marca Marte com capacidade de 210 g e precisão de 0,001 g e um recipiente com água destilada dotado de um duto para escoamento da água. Para cada ensaio, o recipiente foi calibrado através do acréscimo de água até o escoamento. Após o corpo de prova foi imerso e a quantidade de água deslocada foi coletada com uma proveta graduada com capacidade de 100 ml. Após obter a massa e o volume, calculou-se a densidade para cada corpo de prova, onde para cada amostra foram ensaiados 03 corpos de prova.

A determinação da densidade aparente do pó de madeira vegetal, foi realizada conforme a mesma norma, porém de forma adaptada. Para esse ensaio, foi utilizado um recipiente de 80 ml, onde as amostras do pó de madeira foram depositadas e pesadas uma a uma. Em seguida, foi obtida a densidade através da razão entre a massa e o volume.

### 3.5.6 Classificação granulométrica do pó de madeira vegetal

A classificação granulométrica do PMV foi realizada por peneiramento utilizando-se um jogo de peneiras com tamanhos de 20, 28, 35, 48, 60, 70, 100, 200 e 270 mesh. A agitação foi realizada com auxílio de um agitador eletromagnético para peneiras da marca Bertel, Figura 10. Para pesagem utilizou-se uma balança da marca Shimadzu com capacidade de 6200 g, precisão de 0,01 g. A amostra foi pesada e colocada na peneira superior. Após 10 minutos de agitação máxima, verificou-se a quantidade em peso do material depositado em cada peneira.

Figura 10 – Agitador de peneiras eletromagnético



Fonte: Autor (2019)

### 3.6 ANÁLISE COMPARATIVA DA MASSA

A estimativa da massa da caixa de carga foi realizada com o auxílio do software de modelamento 3D Solidworks 2013, o qual forneceu o volume das tampas de uma caixa de carga de um semirreboque de 12,5 m de comprimento. Conhecendo o volume e a densidade realizou-se o cálculo da massa.

Com objetivo de redução de massa na caixa de carga com o material proposto, determinou-se um cálculo para reduzir a espessura das chapas vazadas. Considerando que as espessuras de parede são fixas, não variam, aplicou-se uma regra de três simples para reduzir a espessura da peça, porém mantendo as propriedades de resistência a flexão o mais próximo ao compensado naval, que é o material de referência. A análise contou com o suporte do setor de engenharia da empresa Recrusul S.A de Sapucaia do Sul – RS.

### 3.7 ANÁLISE DO CUSTO DA TROCA DE MATERIAL

A análise do custo da troca de material foi realizada para um semirreboque graneleiro com 12,5 metros de comprimento, considerando o custo das matérias-primas e o custo de mão de obra do setor de pintura, o qual é o mais envolvido nesse processo. Variáveis de processo como energia elétrica, movimentação e outros não foram consideradas. A análise teve suporte dos setores de compras e engenharia de manufatura da empresa Recrusul S.A. de Sapucaia do Sul – RS.

## 4 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

### 4.1 CARACTERIZAÇÃO DO PMV

#### 4.1.1 Dimensões das partículas de PMV

A Tabela 4 apresenta a classificação granulométrica do PMV.

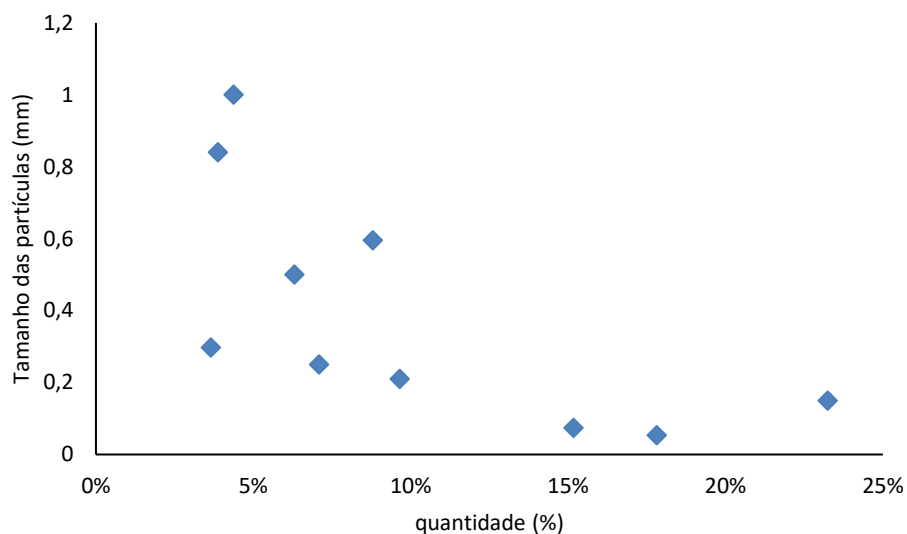
Tabela 4 - Classificação das partículas de PMV

<b>Malha (mesh)</b>	<b>Tamanho (mm)</b>	<b>Quantidade (%)</b>
> 20	1	4
20	0,84	4
28	0,60	9
35	0,50	6
48	0,30	4
60	0,25	7
70	0,21	10
100	0,15	23
200	0,07	15
270	0,05	18

Fonte: Autor (2019)

Conforme mostra a Figura 11, o PMV utilizado é formado por partículas de até 1 mm, sendo que a maior frequência encontrada é de partículas de 0,15 mm com 23%. Os tamanhos de 0,05 a 0,21 mm predominam o PMV com 66% das partículas. Conforme Rodolfo e Vanderley (2006), o tamanho das partículas influencia na resistência mecânica do material. Reforços maiores permitem maior continuidade da matriz de PVC e, portanto, resultam num material mais dúctil, enquanto que reforços menores afetam a continuidade da matriz de PVC e resultam num material mais frágil.

Figura 11 – Gráfico de Distribuição do PMV X tamanho de partícula

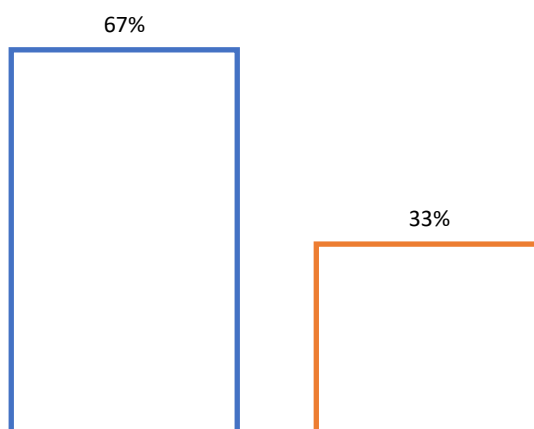


Fonte: Autor (2019)

A Figura 12 mostra que o PMV utilizado é composto por partículas predominantemente grandes, com 67%. Conforme Callister (2011), compósitos reforçados por partículas são subdivididos em compósitos reforçados com partículas grandes, maiores de 0,1 mm e compósitos reforçados por dispersão, partículas pequenas entre 0,01 e 0,1 mm.

Figura 12 – Gráfico da concentração de partículas grandes X pequenas no PMV

■ Partículas Grandes (>0,1mm)    ■ Partículas Pequenas (<0,1mm)



Fonte: Autor (2019)

#### 4.1.2 Determinação da densidade aparente do PMV

A Tabela 5, apresenta a determinação da densidade aparente do pó de madeira vegetal.

Tabela 5 – Densidade aparente do PMV

Amostra	Massa (g)	Volume (ml)	Densidade (g/cm <sup>3</sup> )
1	18,92	80	0,236
2	19,00	80	0,237
3	18,84	80	0,235
4	18,96	80	0,237
5	18,94	80	0,236
Média	18,93	80	0,236
DP	0,06	0,00	0,00074

As amostras avaliadas apresentam densidade média de 0,236 g/cm<sup>3</sup>. Esse valor é considerado baixo uma vez comparado a densidade dos painéis de MDF e MDP. Conforme Vidotto (2017), os painéis de MDP e MDF apresentam densidade de 0,630 e 0,690 g/cm<sup>3</sup>, respectivamente. Já Seter, Melo e Stangerlin (2017), encontraram valores de densidade de painéis de MDP e MDF de 0,621 e 0,632 g/cm<sup>3</sup>, respectivamente. No entanto, cabe ressaltar, que o pó de madeira vegetal utilizado nesse estudo é oriundo do processo de corte dos painéis de MDP e MDF, mais especificadamente, pó de serra, por isso da sua densidade significativamente inferior.

#### 4.2 ENSAIO DE FLEXÃO ESTÁTICA

Os resultados do ensaio de flexão estão apresentados na Tabela 6.

Tabela 6 - Resultados dos ensaios de flexão estática

Amostra	CP	Área (mm <sup>2</sup> )	Força Máx. (Kgf)	Tensão Máx. (MPa)	Deformação (mm)	E (MPa)
Compensado	1	30,96	100,78	31,92	3,5	1883,84
	2	30,80	121,82	38,78	4,83	2045,38
	3	30,52	114,77	36,87	4,82	2161,55
	4	3073	75,75	24,17	2,08	2068,20
	5	30,82	104,00	33,09	4,49	1878,09

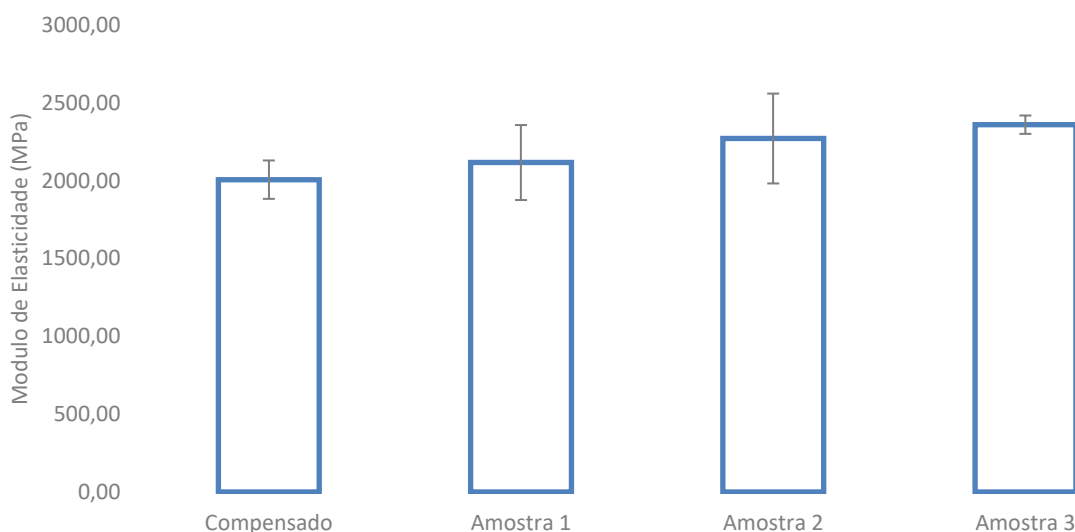


	<b>Méd.</b>	<b>30,76</b>	<b>103,42</b>	<b>32,96</b>	<b>3,94</b>	<b>2007,41</b>
	<b>DP</b>	<b>0,16</b>	<b>17,61</b>	<b>5,65</b>	<b>1,17</b>	<b>123,38</b>
Amostra 1	1	48.67	187.79	37.84	4.93	2004.30
	2	45.21	188.91	40.98	4.99	2329.02
	3	44.55	190.87	42.02	5.50	2381.71
	4	49.25	184.34	36.71	5.41	1796.19
	5	49.68	193.43	38.19	4.87	2075.46
	<b>Méd.</b>	<b>47,47</b>	<b>189,07</b>	<b>39,15</b>	<b>5,14</b>	<b>2117,34</b>
	<b>DP</b>	<b>2,40</b>	<b>3,40</b>	<b>2,25</b>	<b>0,29</b>	<b>241,02</b>
Amostra 2	1	51.18	199.99	38.32	5.00	2092.30
	2	46.64	179.17	37.68	4.50	2509.11
	3	46.64	204.39	43.03	4.44	2506.11
	4	46.68	205.44	43.16	4.70	2396.60
	5	52.33	187.78	35.19	5.89	1854.05
	<b>Méd.</b>	<b>48.68</b>	<b>195.4</b>	<b>39.47</b>	<b>4.907</b>	<b>2271,63</b>
	<b>DP</b>	<b>2.833</b>	<b>11.45</b>	<b>3.503</b>	<b>0.5924</b>	<b>288.75</b>
Amostra 3	1	45.32	153.56	33.23	3.37	2349.71
	2	45.73	163.73	35.12	3.98	2290.00
	3	45.13	164.76	35.80	3.90	2392.86
	4	50.01	186.64	36.60	3.65	2327.77
	5	49.74	190.69	37.60	3.72	2442.75
	<b>Méd.</b>	<b>47,19</b>	<b>171,88</b>	<b>35,67</b>	<b>3,72</b>	<b>2360,62</b>
	<b>DP</b>	<b>2,47</b>	<b>16,00</b>	<b>1,65</b>	<b>0,24</b>	<b>59,10</b>

Fonte: Autor (2019)

Como pode-se observar na Figura 13, comparados ao compensado naval, todas as amostras de compósito apresentaram maior rigidez. Enquanto o compensado naval apresentou módulo de elasticidade médio de 2007,41 MPa, as amostras 1, 2 e 3 apresentaram 2,117,34 MPa, 2271,63 MPa e 2360,62 MPa, respectivamente. A amostra 1, com menor fração de reforço de PMV já apresentou módulo de elasticidade maior que o compensado naval. Com relação aos compósitos, observa-se que o módulo de elasticidade aumenta com o aumento da fração de PMV. Conforme Jeamtrakull *et al.* (2012), com o aumento do teor de madeira tende aumentar a resistência a flexão, indicando o reforço de madeira na matriz de PVC, uma vez que as partículas de madeira são mais rígidas que o PVC.

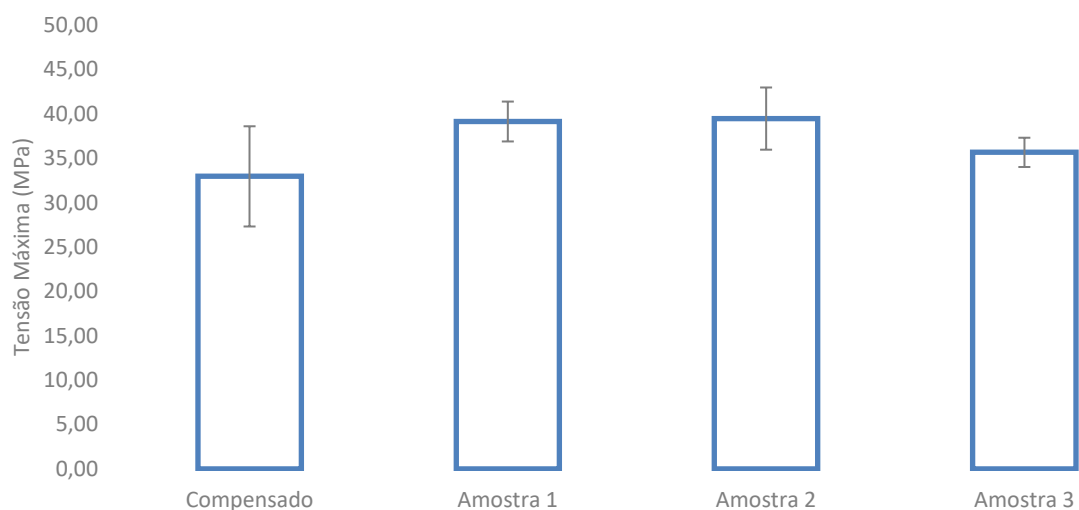
Figura 13 - Gráfico comparativo do módulo de elasticidade entre as amostras



Fonte: Autor (2019)

Na Figura 14 estão apresentados os resultados de resistência à flexão. O compensado naval apresentou resistência inferior a todas as amostras de compósito. Enquanto o compensado naval apresentou resistência média de 32,96 MPa, as amostras 1, 2 e 3 apresentaram 39,15 MPa, 39,49 MPa e 35,67 MPa, respectivamente. Para os compósitos, observa-se que a amostra 1 e 2 tiveram resistência aumentada conforme o teor de PMV, porém a amostra 3 apresentou redução significativa na resistência. Isso pode estar relacionado com a distribuição não uniforme do reforço na matriz devido a maior fração de PMV acrescentado. Segundo Jeamtrakull *et al.* (2012) e Rodolfo e Vanderley (2006), o aumento das propriedades de flexão até uma determinada proporção, indicam que a matriz de PVC foi reforçada pelas partículas de madeira, enquanto que a diminuição das propriedades de flexão provavelmente resultam da dificuldade de dispersão das partículas de madeira na matriz de PVC devido ao alto teor de madeira.

Figura 14 - Gráfico comparativo da resistência a flexão das amostras



Fonte: Autor (2019)

## 4.2 ENSAIO DE IMPACTO IZOD

Os resultados do ensaio de impacto estão apresentados na Tabela 7.

Tabela 7 - Resultados do ensaio de impacto Izod

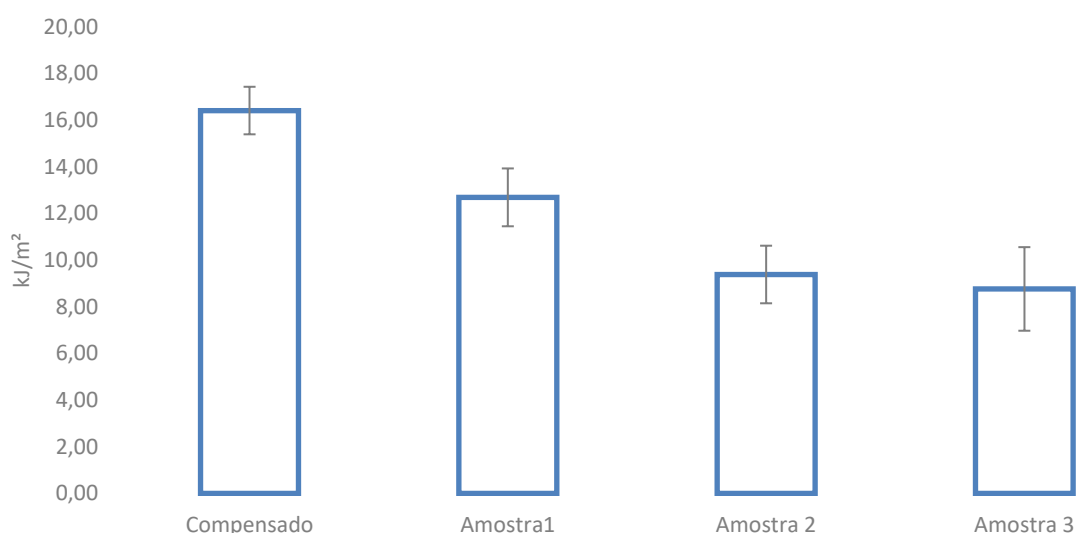
Amostra	CP	Área Seção (m <sup>2</sup> )	Energia Absorvida (J)	Resistência ao Impacto (kJ/m <sup>2</sup> )
Compensado	1	0,000148	2,46	16,66
	2	0,000148	2,5	16,87
	3	0,000148	2,36	15,99
	4	0,000149	2,62	17,60
	5	0,000148	2,2	14,90
	<b>Méd.</b>	<b>0,000148</b>	<b>2,43</b>	<b>16,40</b>
	<b>DP</b>	<b>0,000001</b>	<b>0,16</b>	<b>1,04</b>
Amostra 1	1	0,000161	1,94	12,03
	2	0,000166	1,98	11,95
	3	0,000168	2,00	11,90
	4	0,000169	2,50	14,82
	5	0,000165	2,10	12,72
	<b>Méd.</b>	<b>0,000166</b>	<b>2,10</b>	<b>12,68</b>
	<b>DP</b>	<b>0,000003</b>	<b>0,23</b>	<b>2,05</b>
Amostra 2	1	0,000194	2,10	10,83
	2	0,000199	1,98	9,97

	3	0,000201	1,56	7,78
	4	0,000189	1,60	8,47
	5	0,000195	1,92	9,86
	<b>Méd.</b>	<b>0,000196</b>	<b>1,77</b>	<b>8,74</b>
	<b>DP</b>	<b>0,000005</b>	<b>0,22</b>	<b>1,26</b>
Amostra 3	1	0,000170	1,72	10,10
	2	0,000150	0,92	6,15
	3	0,000169	1,30	7,71
	4	0,000173	1,80	10,38
	5	0,000150	1,42	9,47
	<b>Méd.</b>	<b>0,000162</b>	<b>1,43</b>	<b>8,58</b>
	<b>DP</b>	<b>0,000012</b>	<b>0,35</b>	<b>2,02</b>

Fonte: Autor (2019)

Como pode-se observar na Figura 15, o compensado naval apresentou-se significativamente superior em resistência ao impacto com 16,40 kJ/m<sup>2</sup>, comparado com as amostras 1,2 e 3 que apresentaram resistência ao impacto de 12,68 kJ/m<sup>2</sup>, 8,74 kJ/m<sup>2</sup> e 8,58 kJ/m<sup>2</sup>, respectivamente. Comparando as amostras 1,2 e 3 observa-se a redução da resistência ao impacto com o aumento do teor de PMV. Segundo El-Shekeil *et al.*(2014) e Rodolfo e Vanderley (2006), a redução do teor de PVC reduz a absorção do impacto, uma vez que o PVC possui melhor características de resistência ao impacto.

Figura 15 - Gráfico comparativo de resistência ao impacto Izod das amostras

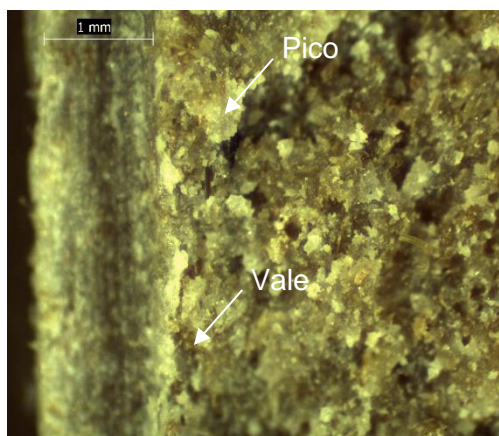


Fonte: Autor (2019)

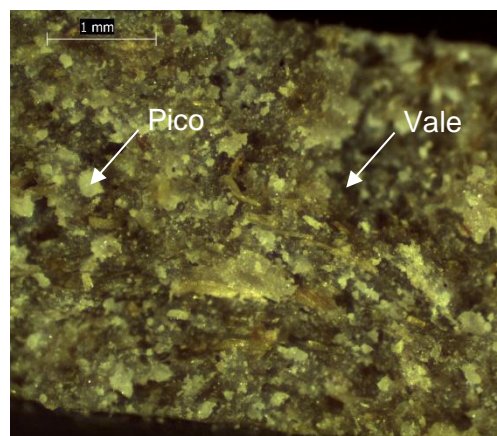
A Tabela 8 apresenta imagens das amostras 1,2 e 3 rompidas pelo ensaio de impacto. É possível identificar, que todas as amostras apresentam picos e vales bem distribuídos. Isso mostra que o arrancamento de material e a fratura das partículas é uniforme e a redução de resistência ao impacto está diretamente ligada ao aumento do teor de PMV. Para Rodolfo e Vanderley (2006), o PMV deve se comportar como fibra de reforço e não como carga de enchimento, ou seja, deve ser possível observar partículas fraturadas e não arrancadas da matriz de PVC. Segundo El-Shekeil *et al.* (2014), a evidência da fraca aderência da fibra com a matriz ou da dispersão não uniforme de PMV na matriz, pode ser confirmada pelos resultados obtidos nos ensaios mecânicos.

Tabela 8 - Imagens da microscopia das amostras de material compósito

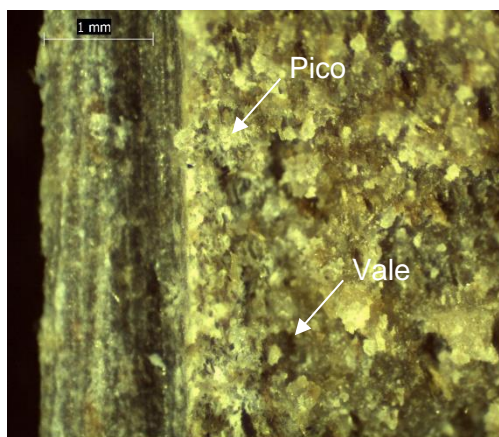
Amostra 1



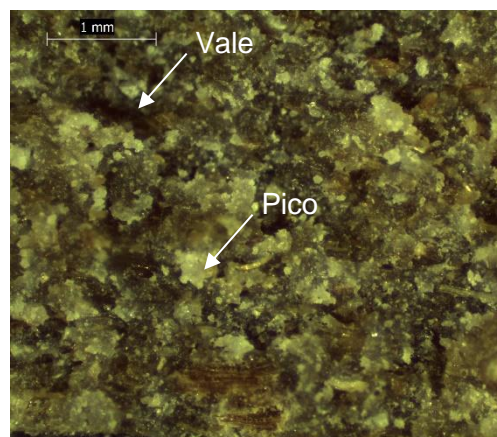
Amostra 1



Amostra 2



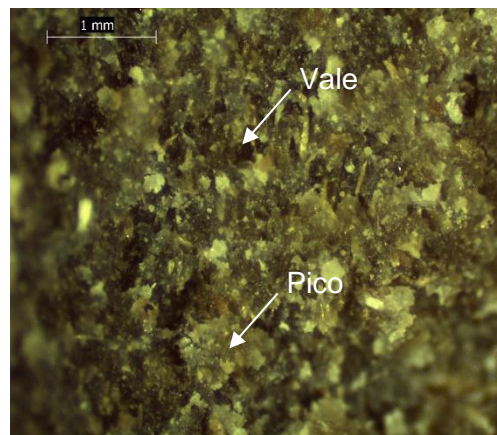
Amostra 2



Amostra 3



Amostra 3



Fonte: Autor (2019)

### 4.3 DETERMINAÇÃO DA DENSIDADE

Os resultados de determinação da densidade estão apresentados na Tabela 9.

Tabela 9 - Resultados dos ensaios de densidade

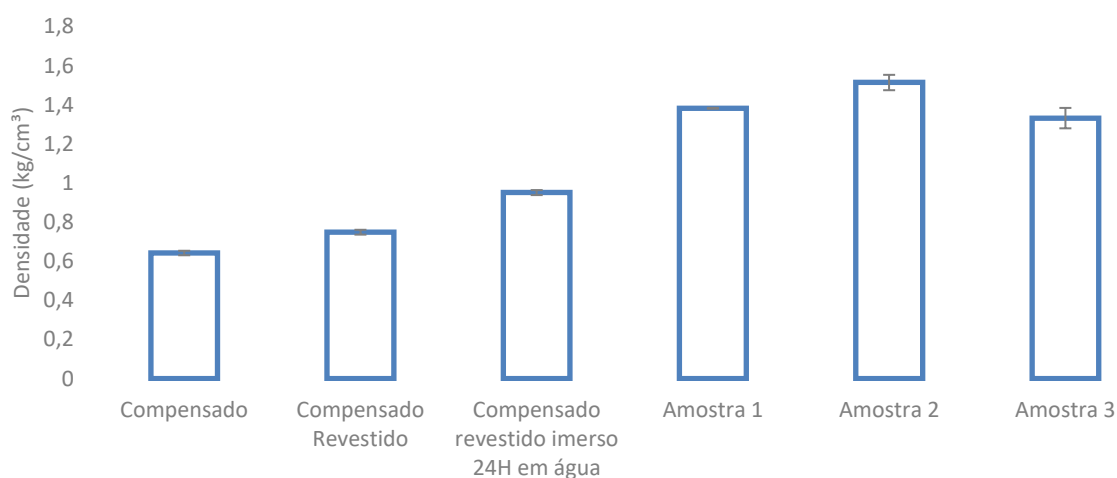
Amostra	CP	Massa (g)	Volume (ml)	Densidade (g/cm <sup>3</sup> )
Compensado	1	15,00	23,50	0,64
	2	15,34	23,20	0,66
	3	15,38	23,90	0,65
	<b>Med.</b>	<b>15,34</b>	<b>23,50</b>	<b>0,65</b>
	<b>DP</b>	<b>0,29</b>	<b>0,35</b>	<b>0,01</b>
Compensado Revestido	1	18,02	24,02	0,75
		18,02	23,80	
	2	17,32	23,80	0,73
	3	17,36	23,20	0,75
	<b>Med.</b>	<b>17,36</b>	<b>23,80</b>	<b>0,75</b>
<b>DP</b>	<b>0,39</b>	<b>0,42</b>	<b>0,01</b>	
Compensado Revestido imerso por 24h em água	1	22,84	24,02	0,95
	2	22,21	23,60	0,94
	3	22,42	23,20	0,97
	<b>Med.</b>	<b>22,42</b>	<b>23,60</b>	<b>0,95</b>
	<b>DP</b>	<b>0,32</b>	<b>0,41</b>	<b>0,01</b>
Amostra 1	1	24,87	18,00	1,38
	2	26,19	19,00	1,38
	3	25,99	18,8	1,38
	<b>Med.</b>	<b>25,99</b>	<b>18,80</b>	<b>1,38</b>
	<b>DP</b>	<b>0,71</b>	<b>0,53</b>	<b>0,00</b>

Amostra 2	1	27,17	17,80	1,53
	2	26,94	17,80	1,51
	3	27,17	18,70	1,45
	<b>Med.</b>	<b>27,17</b>	<b>17,80</b>	<b>1,51</b>
	<b>DP</b>	<b>0,13</b>	<b>0,52</b>	<b>0,04</b>
Amostra 3	1	25,47	18,00	1,41
	2	23,70	17,80	1,33
	3	25,06	19,00	1,32
	<b>Med.</b>	<b>25,06</b>	<b>18,00</b>	<b>1,33</b>
	<b>DP</b>	<b>0,93</b>	<b>0,64</b>	<b>0,05</b>

Fonte: Autor (2019)

Como observa-se na Figura 16, a densidade do compensado naval é bastante inferior as demais amostras. Enquanto o compensado naval apresentou densidade de  $0,65 \text{ g/cm}^3$ , as amostras 1,2 e 3 apresentaram densidade de  $1,38 \text{ g/cm}^3$ ,  $1,51 \text{ g/cm}^3$  e  $1,33 \text{ g/cm}^3$ , respectivamente. Observa-se que o revestimento do compensado naval implica em um aumento de densidade de 13% comparado ao compensado naval sem revestimento. Já o compensado revestido e mergulhado em água por 24 horas, apresentou um aumento de densidade em torno de 32%. As amostras 1,2, e 3 são 53%, 57% e 51% respectivamente mais densos que o compensado naval.

Figura 16 – Gráfico comparativo da densidade das amostras



Fonte: Autor (2019)

Comparando as amostras 1,2 e 3, observa-se que a amostra 3 apresentou menor densidade devido ao aumento do teor de PMV, o qual é menos denso que o composto de PVC. Conforme Rowell *et al* (1997), uma das principais vantagens de usar fibras lignocelulósicas como reforços em plásticos é a redução da densidade do compósito, uma vez que as fibras lignocelulósicas são menos densas que o composto de PVC.

#### 4.4 ABSORÇÃO DE ÁGUA

Os resultados do ensaio de absorção de água estão apresentados na Tabela 10.

Tabela 10 - Resultados dos ensaios de absorção de água

	CP	Peso após 24h de estufa a 50°C (g)	Peso após 24h submerso em água (g)	Absorção de água (%)
Compensado	1	11,00	18,57	69,00%
	2	11,14	18,57	67,00%
	3	11,57	18,61	61,00%
	4	11,50	18,86	64,00%
	5	10,77	17,53	63,00%
	<b>Med.</b>	<b>11,19</b>	<b>18,43</b>	<b>64,80%</b>
	<b>DP</b>	<b>0,34</b>	<b>0,52</b>	<b>3,19%</b>
	Compensado revestido	1	17,28	22,84
2		16,02	22,24	38,82%
3		16,20	22,21	37,09%
4		16,40	22,18	35,22%
5		16,05	22,42	39,70%
<b>Med.</b>		<b>16,39</b>	<b>22,38</b>	<b>36,60%</b>
<b>DP</b>		<b>0,52</b>	<b>0,27</b>	<b>3,01%</b>
Amostra 1		1	24,91	25,21
	2	26,22	26,45	0,87%
	3	26,02	26,28	1,00%
	4	25,25	25,56	1,24%
	5	26,50	26,76	0,96%
	<b>Med.</b>	<b>25,78</b>	<b>26,05</b>	<b>1,06%</b>
	<b>DP</b>	<b>0,67</b>	<b>0,64</b>	<b>0,16%</b>
	Amostra 2	1	27,20	27,40
2		26,97	27,20	0,87%
3		26,92	27,16	0,88%
4		27,18	27,38	0,71%
5		27,02	27,23	0,78%

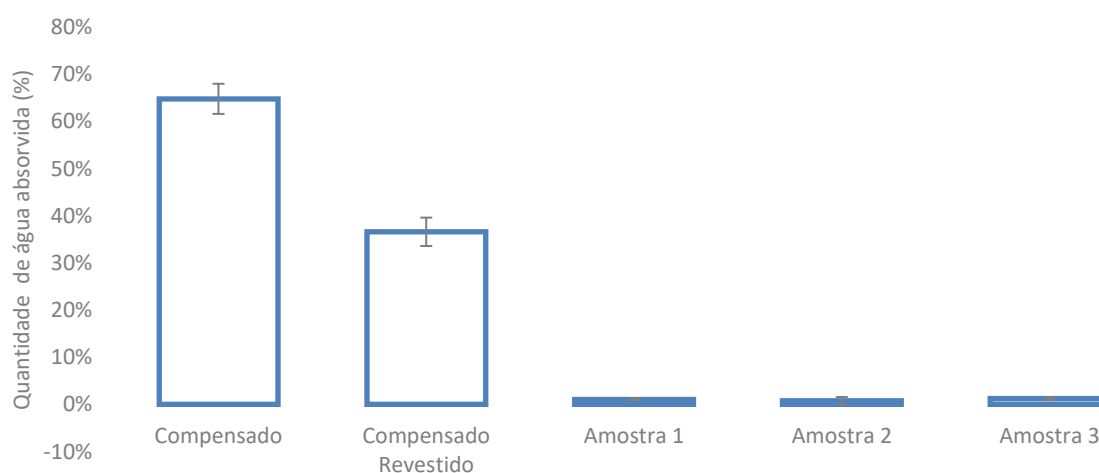


	<b>Med.</b>	<b>27,06</b>	<b>27,27</b>	<b>0,80%</b>
	<b>DP</b>	<b>0,12</b>	<b>0,11</b>	<b>0,08%</b>
Amostra 3	1	25,49	25,89	1,57%
	2	23,72	24,05	1,37%
	3	25,09	25,34	1,00%
	4	25,21	25,55	1,33%
	5	26,19	26,41	0,84%
	<b>Med.</b>	<b>25,14</b>	<b>25,45</b>	<b>1,22%</b>
	<b>DP</b>	<b>0,90</b>	<b>0,88</b>	<b>0,29%</b>

Fonte: Autor (2019)

Conforme pode-se observar na Figura 17, o compensado naval apresentou maior absorção de água comparado ao demais amostras, cerca de 65%. O revestimento aplicado ao compensado reduz em cerca de 43% a absorção de água. As amostra 1, 2 e 3, apresentaram 1%, 2% e 1% de absorção de água respectivamente. Isso mostra que as partículas de madeira estão bem envolvidas pela matriz de PVC, ou seja, há uma boa interface de ligação entre a matriz de PVC e o reforço de PMV. Conforme Rowell *et al* (1997), a absorção de umidade é minimizada no compósito devido ao encapsulamento do reforço pela matriz e uma boa interface de ligação entre matriz e reforço também diminui a taxa de absorção de umidade.

Figura 17 – Gráfico comparativo de absorção de água das amostras.



Fonte: Autor (2019)

#### 4.6 ANÁLISE COMPARATIVA DA MASSA DA CAIXA DE CARGA

A Tabela 11 apresenta o resultado da análise comparativa da massa de uma caixa de carga de um semirreboque granaleiro com 12,5 de comprimento e 1,8 metros de altura.

Tabela 11 – Resultados da análise comparativa da massa

Análise comparativa do peso da caixa de carga							
Material	Espessura (mm)	E (MPa)	$\sigma_{\text{máx.}}$ (MPa)	Volume (cm <sup>3</sup> )	Densidade (g/cm <sup>3</sup> )	Massa (g)	Massa (kg)
Compensado naval	12	2007,41	32,96	564559,20	0,65	366963,48	366,96
Compensado naval emborrachado	12	2007,41	32,96	564559,20	0,75	423419,40	423,42
Compensado naval emborrachado e imerso em água por 24h.	12	2007,41	32,96	564559,20	0,94	530685,65	530,69
Amostra 1	18	2117,34	39,15	351609,65	1,38	485221,32	485,22
Amostra 2	18	2271,63	39,47	351609,65	1,51	530930,57	530,93
Amostra 3	18	2360,62	35,67	351609,65	1,33	467640,83	467,64
Amostra redimensionada	15,5	2032,75	30,72	324869,92	1,33	432077,00	432,08

Fonte: Autor (2019)

A caixa de carga com compensado naval emborrachado apresenta-se mais leve que a caixa de carga com o material proposto. Em compensado naval emborrachado a massa da caixa de carga ficou com 423,42 kg, enquanto que as caixas de carga com amostras 1,2 e 3 ficaram com 485,22 kg, 530,68 kg e 485,22 kg, respectivamente. Já a caixa de carga com compensado naval emborrachado e imerso em água por 24 h, apresentou massa de 530,68 kg, mais leve que a caixa de carga com a amostra 2 apenas. A caixa de carga com a amostra redimensionada ficou com 432,1 kg, cerca de 2% mais pesada que a caixa de carga de compensado naval emborrachado.

## 4.7 ANÁLISE DE CUSTO

A Tabela 12 apresenta a análise de custo para a troca de material, considerando um semirreboque de 12,5 m de comprimento e caixa de carga com altura de 1,8 m.

Tabela 12 – Resultados da análise do custo de troca do material

Análise de custo de uma caixa de carga atual X proposta (SR Granelheiro 3 Eixos 12.530mm)					
Material Atual					
Materia prima	Quantidade	Custo (R\$/m <sup>2</sup> )	Mão Obra (horas)	Custo (R\$/hora)	Custo Total (R\$)
Compensado naval (m <sup>2</sup> )	47	R\$ 42,18			R\$ 1.982,46
Revestimento (L)	45	R\$ 9,50	2,5	R\$ 17,00	R\$ 470,00
Tinta (L)	22	R\$ 28,00	1,5	R\$ 17,00	R\$ 641,50
Total					R\$ 3.093,96
Material Proposto					
Materia prima	Quantidade	Custo	Mão Obra (horas)	Custo (R\$/hora)	Custo Total (R\$)
Compósito (m <sup>2</sup> )	47	R\$ 65,00			R\$ 3.055,00
Tinta (L)	11	R\$ 22,50	0,75	R\$ 17,00	R\$ 260,25
Total					R\$ 3.315,25

Fonte: Autor (2019)

O material proposto gera um aumento de R\$ 221,29 no custo do produto, cerca de 7%. Esse aumento está diretamente ligado ao valor das chapas que passaram de R\$ 42,18 para R\$ 65,00 por m<sup>2</sup>, cerca de 35% de aumento. Mesmo com a simplificação do processo, redução de mão de obra e de material, o valor ficou acima.

## 5 CONCLUSÕES

O estudo apresentado mostra que o material alternativo proposto é tecnicamente viável para substituir o compensado naval na aplicação de caixas de carga de semirreboques graneleiros.

A caracterização do compensado naval foi fundamental para balizar propriedades mecânicas e físicas e servir como referência para o desenvolvimento do material proposto. Além disso, foi importante para levantar algumas propriedades que eram desconhecidas para o seguimento, como por exemplo o acréscimo de densidade causada pelo emborrachamento e quanto esse revestimento é eficaz na impermeabilização da chapa.

As quantidades dos percentuais de carga e matriz das amostras de material compósito desenvolvidas foram definidas com base na revisão da literatura. Os resultados dos ensaios de flexão mostraram que os percentuais foram bem definidos, para o propósito do trabalho, uma vez que ficou evidente o aumento de resistência mecânica com o incremento do teor de PMV, que era o objetivo da mistura.

A fabricação das amostras demandou bastante tempo, pois foi difícil encontrar um possível fornecedor que tivesse os recursos adequados e interesse em produzir as peças. No entanto, no momento em que essa empresa foi encontrada, as amostras foram fabricadas dentro do que foi planejado e sem maiores problemas. Nas imagens capturadas no ensaio de microscopia, verificou-se a distribuição do reforço na matriz e a adesão entre as fases, indicando que o processo de fabricação atendeu a expectativa desejada. Inclusive essa adesão e/ou envolvimento do reforço pela matriz, é evidenciada nos resultados de ensaio de flexão e absorção de água.

Os resultados dos ensaios mecânicos e físicos mostraram que nem todas as propriedades do material proposto superam o compensado naval. Em termos de resistência à flexão o material compósito é ligeiramente superior, no entanto em resistência ao impacto é inferior. A densidade do material proposto apresentou-se bastante superior, mas em contrapartida apresentou baixíssima absorção de água e possibilidade da redução de massa da peça através do vazamento das chapas.

Os resultados da análise comparativa da massa da caixa de carga mostraram que trabalhando com o material de densidade  $1,33 \text{ g/cm}^3$  e de 18 mm de espessura, o aumento da massa é insignificante para a aplicação, cerca de 44,22 kg. Entretanto, é possível utilizar uma chapa de 15,5 mm de espessura com o material de mesma densidade e reduzir essa diferença a menos de 10 kg, sem contar que o compensado naval está completamente suscetível a absorção de umidade, o que já seria suficiente para eliminar essa diferença.

O aumento do custo da troca do material é considerado satisfatório tanto para a fabricante de semirreboques como para os frotistas. Além de possuir maior vida útil, é resistente, o aumento de massa é insignificante, é ecologicamente correto, torna o processo de fabricação do semirreboque mais simples, ou seja, agrega valor ao produto final.

## 5.1 CONTRIBUIÇÃO DO TRABALHO

O trabalho apresentado impacta de forma positiva no segmento de implementos rodoviários e na sociedade. Utilizar um material que simplifica o processo de fabricação, melhora a qualidade e a vida útil dos semirreboques e reduz a quantidade de resíduos destinados ao meio ambiente, são ações ecologicamente corretas e que contribuem para a empresa e para a sociedade.

## 5.2 POSSIBILIDADES DE TRABALHOS FUTUROS

Com base nos resultados obtidos, sugerem-se os seguintes temas para trabalhos futuros:

- Processar e analisar novas formulações de PVC com pó de madeira micronizado para verificar possíveis melhorias na adesão interfacial e consequentemente na resistência mecânica.
- Estudar nova formulação com acréscimo de agente expensor, para reduzir a densidade e melhorar a resistência ao impacto do material.

- Verificar a possibilidade de acrescentar co-extrusão ao processo para evitar a aplicação de pintura nas chapas.

## REFERÊNCIAS

ABIMCI. **Catálogo Técnico do Compensado de Pinus**. Associação Brasileira da Indústria da Madeira Processada Mecanicamente. Disponível em: <[http://www.abimci.com.br/wp-content/uploads/2014/02/Catalogo\\_Tecnico\\_Compensado\\_Pinus.pdf](http://www.abimci.com.br/wp-content/uploads/2014/02/Catalogo_Tecnico_Compensado_Pinus.pdf)>. Acesso em: 08 fev. 2019.

ABNT. **Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 9486** - Compensado - Determinação da absorção de água. Rio de Janeiro, Dezembro, 2011.

AGDI, A. G. D. D. E. P. D. I. **Política Setorial Automotivo e Implementos Rodoviários**. Rio Grande do Sul, 2012.

ASTM - American Society for Testing and Materials. **ASTM D 256 - 02 - Standard Test Methods for Determining the Izod Pendulum Impact Resistance of Plastics**.

ASTM - American Society for Testing and Materials. **ASTM D 790 - 03 - Standard Test Methods for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials**.

ASTM - American Society for Testing and Materials. **ASTM D 792 - 08 - Standard Test Methods for Density and Specific Gravity (Relative Density) of Plastics by Displacement**.

ANFIR. **Anuário da Indústria de Implementos Rodoviários**. São Paulo: Associação Nacional dos Fabricantes de Implementos Rodoviários, 2016.

ANFIR 2019. **Emplacamento do setor**. Disponível em: <[https://www.anfir.org.br/ADM/VIEW/ARQUIVO/ESTATISTICA/1554721812-Desempenho%20\\_1Trimestre\\_2019.pdf](https://www.anfir.org.br/ADM/VIEW/ARQUIVO/ESTATISTICA/1554721812-Desempenho%20_1Trimestre_2019.pdf)>. Acesso em: 10 fev. 2019.

BORTOLETTO JÚNIOR, G.; GARCIA, J. N. Propriedades de resistência e rigidez à flexão estática de painéis OSB e compensados. **Revista Árvore**, v. 28, p. 563 citation\_lastpage= 570, 2004.

BRASKEM. **Boletim técnico nº 3 PVC: Propriedades de referência dos compostos de PVC.** 2002. Disponível em: < [https://www.braskem.com.br/Portal/Principal/Arquivos/html/boletm\\_tecnico/Tabela\\_d\\_e\\_Propriedades\\_de\\_Referencia\\_dos\\_Compostos\\_de\\_PVC.pdf](https://www.braskem.com.br/Portal/Principal/Arquivos/html/boletm_tecnico/Tabela_d_e_Propriedades_de_Referencia_dos_Compostos_de_PVC.pdf) >. Acesso em: 10 Jul. 2018.

CALLISTER, J. W. D. **Ciência e Engenharia de Materiais - Uma Introdução.** 8. ed. Rio de Janeiro: 2012. 809p.

CARNEIRO, A. M. A. J. T, L. Propriedades e características dos materiais compósitos poliméricos aplicados na Engenharia de Construção. **Revista Militar de Ciência e Tecnologia.** XXV: 1-13 p. 2008.

CORREA, C. A. et al. compositos termoplasticos com madeira. **Revista Polímeros: Ciência e Tecnologia.** V.13, nº 3, p. 154-165, 2003.

CASTILHOS, L. V. **Projeto e construção da tampa lateral inferior de um semireboque destinado ao transporte de grãos.** 2011. 86 (Graduação em Engenharia Mecânica). Departamento de Engenharia Mecânica, UCS - Universidade de Caxias do Sul, Caxias do Sul.

CNT, C. N. D. T. **Entraves logísticos ao escoamento de soja e milho.** São Paulo: Desenvolvimento T, 2015.

EL-SHEKEIL, Y. A. et al. Influence of fiber content on mechanical, morphological and thermal properties of kenaf fibers reinforced poly(vinyl chloride)/thermoplastic polyurethane poly-blend composites. **Materials and Design**, v. 58, p. 130-135, 2014. Disponível em: < <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-84894038465&doi=10.1016%2fj.matdes.2014.01.047&partnerID=40&md5=1c133219a0e26f6ce6831c0c2f887e12> >. Acesso em: 15 fev. 2019.

LEVY NETO, L. C. P. F. **Compósitos Estruturais.** 1. ed. São Paulo, 2006. 313 p. ISBN 978-85-212-0397-1.

JEAMTRAKULL, S. et al. Effects of wood constituents and content, and glass fiber reinforcement on wear behavior of wood/PVC composites. **Composites Part B: Engineering**, v. 43, n. 7, p. 2721-2729, 2012. ISSN 1359-8368. Disponível em: < <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359836812002703>>. Acesso em: 12 fev. 2019.



MATTOS, R. L. G.; GONÇALVES, R. M.; LACERDA, F. D. C. Painéis de madeira no Brasil: panorama e perspectivas. **BNDES setorial, Rio de Janeiro**, n. 27, p. 121-156, 2008.

MATUANA, L. M.; PARK, C. B.; BALATINECZ, J. J. Cell morphology and property relationships of microcellular foamed pvc/wood-fiber composites. **Polymer Engineering & Science**, v. 38, n. 11, p. 1862-1872, 1998. ISSN 1548-2634. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1002/pen.10356>>. Acesso em: 20 fev. 2019

MATUANA, L. M. et al. Influence of interfacial interactions on the properties of PVC/cellulosic fiber composites. **Polymer Composites**, v. 19, n. 4, p. 446-455, 1998. ISSN 1548-0569. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1002/pc.10119>>. Acesso em: 20 fev. 2019

MATTOS, C. ; FRANCISQUETTI, E. *Review*: compositos poliméricos para substituir madeira aplicada em semirreboques - fatores que influenciam no comportamento mecânico. **Revista Liberato de Educação, Ciência e Tecnologia**. V.19, nº 32, 2018.

PALMASOLA. **Tampa Lateral**. 2018. Disponível em: <<http://www.palmasola.com.br/produtos/Automotivo-Tampa-Lateral.aspx?Ing=pt-BR>>. Acesso em: 24 jan. 2018.

RODOLFO, A.; VANDERLEY, M. J. Desenvolvimento de PVC reforçado com resíduos de Pinus para substituir madeira convencional em diversas aplicações. **Polímeros: Ciência e Tecnologia**, v. 16, n. 1, 2006.

ROWELL, R. M. *et al.* **Lignocellulosic-Plastics Composites - Utilization of Natural Fibers in Plastic Composites: Problems and Opportunities**. EUA: Madson, 1997.

SARTORI, L. **Avaliação comparativa de desempenho ambiental de duas caixas de carga de semi-reboque bitrem graneleiro: compósito natural versus compósito sintético**. 2007. 81 (Mestrado em Materiais). Programa de Pós-Graduação em Materiais, Universidade de Caxias do Sul, Caxias do Sul.

SETER, C. ; MELO, R. R.; STANGERLIN, D. M. Propriedades físicas e mecânicas de painéis aglomerados e de fibras de média densidade. **Congresso Brasileiro de Ciencia e Tecnologia da Madeira**. Instituto de Ciencia agrárias e Ambientais. Universidade Federal do Mato Grosso, Sinop.

SCHACKELFORD, J. F. **Ciência dos Materiais**. 6. ed. São Paulo: 2008. 557 ISBN 978-85-7605-160-2.

SILVA, C. B. et al. Qualidade de compensado fabricados com adesivos à base de tanino-formaldeído de pinus oocarpa e fenol-formaldeído. **Floram: Floresta e Ambiente**, v. 19, n. 4, p. 511-519, 2012.

VIDOTTO, F. M. **Propriedades físicas de painéis de madeira comercializados em cuiabá - MT** . 2017. (Graduação em Engenharia Florestal). Departamento de Engenharia Florestal, Universidade Federal do Mato Grosso, Cuiabá.

**ANEXO A – Imagem do modelo em 3D dos protótipos das tampas**