

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
CENTRO TECNOLÓGICO DE JOINVILLE  
CURSO DE ENGENHARIA FERROVIÁRIA E METROVIÁRIA

ESTEVÃO MOURA COSTA

ANÁLISE ESTRUTURAL DE UM VAGÃO GRANELEIRO EM COMPÓSITOS

Joinville

2018

ESTEVÃO MOURA COSTA

ANÁLISE ESTRUTURAL DE UM VAGÃO GRANELEIRO EM COMPÓSITOS

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

Orientador: Dr. Eng. Gabriel Benedet Dutra

Joinville

2018

ESTEVÃO MOURA COSTA

ANÁLISE ESTRUTURAL DE UM VAGÃO GRANELEIRO EM COMPÓSITOS

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

**Banca Examinadora:**

---

Dr. Eng. Gabriel Benedet Dutra  
Orientador  
Presidente

---

Me. Eng. Vitor Takashi Endo  
Membro  
Universidade Federal de Santa Catarina

---

Dr. Eng. Regis Kovacs Scalice  
Membro  
Universidade Federal de Santa Catarina

Dedico este trabalho a Deus e a minha família.

## **AGRADECIMENTOS**

A Deus, nosso criador do Universo.

À minha mãe que sempre me apoiou e é meu exemplo de força.

Às minhas três famílias Moura, Costa e Fonseca que sempre permaneceram unidas e são minha base.

Ao meu vô José Francisco que é meu grande exemplo.

À minha grande companheira Caroline, que Deus colocou em minha vida.

Aos meus excelentes amigos: Danilo, Guilherme, Saely, Kalvin, Júlia, Judah, Victor, Danylle e muitos outros que estão ou estiveram presentes em minha caminhada.

Agradeço a todos professores que fizeram parte da minha formação.

Agradeço à equipe Eficem, time de competição que trabalhei durante a graduação, obtemos muitas conquistas e foi um grande aprendizado.

Agradeço ao Marlon, Jim e o Guilherme que contribuíram no modelamento geométrico do vagão.

À Janaína Amaral e a Nayara que contribuíram com várias informações neste trabalho.

Agradeço a meus professores Gabriel, Vitor, Régis, Ricardo que tiveram grande influência na escolha do tema deste trabalho e contribuíram com muitos conhecimentos.

Agradeço à empresa Greenbrier Maxion que disponibilizou a parte da norma necessária para fazer este trabalho.

Agradeço as empresas Gerdau, ABCOL e E-composites que contribuíram com as cotações das matérias primas para fabricação do vagão.

E ainda que tivesse o dom de profecia, e conhecesse todos os mistérios e toda a ciência, e ainda que tivesse toda a fé, de maneira tal que transportasse os montes, e não tivesse amor, nada seria.

1 Coríntios 13:2.

## RESUMO

Este trabalho analisou estruturalmente um vagão graneleiro em compósitos e abordou discussões acerca de tópicos relacionados à fabricação, degradação e custo de matéria-prima. Inicialmente, foi proposto uma nova geometria para a caixa do vagão que tenha menor concentração de tensão, aproveitando a facilidade dos materiais compósitos na fabricação de geometrias complexas. Utilizando o método de elementos finitos, três arranjos estruturais foram analisados para o vagão em compósitos. Com as análises foi possível verificar que a melhor disposição estrutural foi do arranjo com cavernas estruturais. A partir das análises, foi feita uma discussão dos problemas e soluções de manufatura do vagão proposto, como a união da longarina central e dos mecanismos de escotilha e tremonha com a caixa do vagão em compósitos. Após esta discussão de fabricação, foi abordado sobre a degradação dos materiais compósitos e as possíveis soluções considerando outros modos de falha como fadiga. Também foi realizada uma análise do custo de produção do vagão em compósitos comparando com o custo da matéria prima do vagão em aço.

**Palavras-chave:** Vagão graneleiro em compósitos. Materiais compósitos. Arranjo estrutural.

## **ABSTRACT**

This paper structurally analyzed a composites bulk freight wagon and discussed about manufacture, degradation and cost of the material composites in this project. Initially, a new geometry was proposed for the box of the wagon that has lower stress concentration, taking advantage of the facilities to manufacture with composites material in complex geometries. Using the finite element method, three structural arrangements were analyzed for the composite freight wagon. Possibility is there to verify that the caves structural arrangements obtained the best results. Additionally, a discussion was developed about problems and solutions in manufacturing the proposed wagon, such as the unions between the center beam, hatch and hoppers mechanisms with the surface of the composite wagon. Moreover, after this manufacturing review, it was analysed that the degradation of composite materials and possible solutions considering other failure modes such as fatigue. Also, it was made a cost analysis of the composites wagon production comparing with the steel wagon cost.

**Keywords:** Composites bulk freight wagon. Composite materials. Structural arrangement.

## LISTA DE GRÁFICO

GRÁFICO 1 – Unidades de vagão produzidas no brasil por quinquênio.....7

GRÁFICO 2 – Comparação dos preços de materiais dos vagões variando o material. .60

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Superestrutura de um vagão de carga. ....	8
Figura 2 – Reforçadores no vagão hopper e vagão gôndola .....	9
Figura 3 – Vagão hopper da greenbrier maxion. ....	10
Figura 4 – Disposição dos painéis sanduiche. ....	12
Figura 5 – Materiais usados na confecção do boeing 787. ....	13
Figura 6 – Componentes de compósitos e fibras naturais do mercedes e-class.....	14
Figura 7 – Construção de barco em compósito.....	15
Figura 8 – Junção de duas partes de uma pá eólica.....	16
Figura 9 – Trem alstom etr 675, feito em compósitos. ....	17
Figura 10 – Mapa de processos da metodologia.....	19
Figura 11 – Casca do vagão modelada no RHINOCEROS. ....	22
Figura 12 – Vista lateral do vagão cotada. ....	23
Figura 13 – Modelo simétrico do vagão. ....	24
Figura 14 – Modelo simétrico do vagão com cavernas. ....	24
Figura 16 – Plote das direções das máximas tensões principais do a) primeiro modelo; b) segundo modelo e c) terceiro modelo. ....	34
Figura 17 – Plote das direções do laminado nos modelos estruturais. A) primeiro modelo; b) segundo modelo; c) terceiro modelo. ....	36
Figura 18 – Plote das direções das máximas tensões principais do vagão sem reforço em compósitos. ....	37
Figura 19 – a) Vagão com reforçadores e b) perfil dos elementos de viga. ....	40
Figura 20 – Plote de deslocamento do terceiro modelo estrutural .....	42
Figura 21 – Plote das tensões longitudinais a) primeiro modelo; b) segundo modelo e c) terceiro modelo.....	43
Figura 22 – Gráficos comparativos dos três modelos estruturais: a) espessura das lâminas, b) peso da caixa, c) peso total do vagão e d) deslocamento máximo.....	44
Figura 23 – Vagão hopper, com vista interna, para visualizar disposição da longarina central. ....	47
Figura 24 – Impregnação da resina no processo de infusão do vagão de sergeichev...48	

Figura 25 – Vista interna de um barco em fibra de vidro com reforçadores. ....	50
Figura 26 – Consume de um comboio de 330 vagões .....	61

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Valores para cálculo do carregamento. ....	21
Tabela 2 – Características da geometria do vagão. ....	23
Tabela 3 – Propriedades da fibra e da resina.....	25
Tabela 4 – Propriedades no núcleo inercial. ....	26
Tabela 5 – Valores das propriedades da lâmina calculada com as equações. ....	28
Tabela 6 – Cálculo do peso da infraestrutura do vagão .....	32
Tabela 7 – Principais resultados da análise em compósitos sem reforçador. ....	38
Tabela 8 – Principais resultados da análise em compósitos com reforçador. ....	40
Tabela 9 – Principais resultados da análise em compósitos com cavernas.....	42
Tabela 10 – Cálculo dos custos de materiais consumíveis baseados no preço da revendedora on-line e-composites. ....	56
Tabela 11 – Cálculo dos custos de materiais compósitos baseados no preço da revendedora abcol.....	56
Tabela 11 – Cálculo dos custos de materiais compósitos baseados no preço da revendedora abcol.....	57
Tabela 12 – Custo total líquido de produção do vagão. ....	58
Tabela 13 – Cotação do aço cor 500 da empresa gerdau. ....	59

## **LISTA DE ABREVIATURAS**

AAR – America Association of Railway

ABIFER – Associação Brasileira da Indústria Ferroviária

ACT – Aparelho de Choque e Tração

CNT – Confederação Nacional do Transporte

DNV – Det Norske Veritas

IPI – Imposto sobre Produtos Industrializados

PVC - Policloreto de Vinila

## LISTA DE SÍMBOLOS

$A_{vag\tilde{a}o}$	Área da superfície do vagão	[m <sup>2</sup> ]
$D$	Distância entre mina de ferro ao porto	[km]
$D_{l\tilde{a}minas}$	Soma dos diâmetros das lâminas	[m]
$D_{n\tilde{u}cleo}$	Diâmetro do núcleo	[m]
$E_{11}$	Módulo de elasticidade longitudinal da lâmina	[MPa]
$E_{22}$	Módulo de elasticidade transversal da lâmina	[MPa]
$E_{FL}$	Módulo de elasticidade longitudinal da fibra	[MPa]
$E_{FT}$	Módulo de elasticidade Transversal da fibra	[MPa]
$E_m$	Módulo de elasticidade da matriz	[MPa]
$EE$	Eficiência da composição ferroviária	
$\varphi$	Fração volumétrica da fibra no laminado	
$g$	Gravidade	[m/s <sup>2</sup> ]
$G_{12}$	Módulo de cisalhamento do laminado no plano 12	[MPa]
$G_{13}$	Módulo de cisalhamento do laminado no plano 13	[MPa]
$G_{23}$	Módulo de cisalhamento do laminado no plano 23	[MPa]
$G_f$	Módulo de cisalhamento da fibra	[MPa]
$G_m$	Módulo de cisalhamento da matriz 23	[MPa]
$h_{vag\tilde{a}o}$	Altura total da parede do vagão	[m]
$P_{caixa}$	Peso da caixa	[kg]
$P_{infra}$	Peso da infraestrutura do vagão	[kg]
$P_{laminado}$	Peso do laminado	[kg]
$P_{n\tilde{u}cleo}$	Peso do núcleo	[kg]
$P_{painel/m^2}$	Peso do painel por metro quadrado	[kg]
$P_{reduzido}$	Peso reduzido do vagão em compósitos	
$P_{vag\tilde{a}o}$	Peso total do vagão descarregado	[kg]
$P(h)$	Pressão da força hidrostática dependente da altura	[MPa]

$P(h)_{máximo}$	Pressão hidrostática máxima, no fundo do vagão	[MPa]
$\psi$	Fração mássica da fibra no laminado	
$\rho_{água}$	Densidade da água	[kg/m <sup>3</sup> ]
$\rho_f$	Densidade da fibra	
$\rho_m$	Densidade da matriz	
$\rho_{soja}$	Densidade da soja	[kg/m <sup>3</sup> ]
$TKB_{redução}$	Tonelada bruta quilômetro do peso reduzido	[T.km/10 <sup>3</sup> ]
$\nu_{12}$	Coefficiente de Poisson da lâmina no plano 12	
$\nu_f$	Coefficiente de Poisson da fibra	
$\nu_m$	Coefficiente de Poisson da matriz	

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	<b>4</b>
1.1 OBJETIVOS .....	5
<b>2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b> .....	<b>7</b>
2.1 VAGÕES .....	7
2.1.1 Estrutura e infraestrutura de vagões .....	8
2.1.2 Reforçadores nas caixas dos vagões.....	9
2.1.3 Geometria baseada neste trabalho .....	10
2.2 Materiais compósitos.....	11
2.2.1 Painéis sanduíche .....	12
2.2.2 Materiais compósitos aplicados nas outras indústrias.....	13
2.2.3 Materiais compósitos aplicados em vagões de carga. ....	17
<b>3 METODOLOGIA</b> .....	<b>19</b>
3.1 CONDIÇÕES DE CARGA UTILIZADAS EM PROJETOS DE VAGÃO .....	20
3.2 GEOMETRIA.....	22
3.3 PROPRIEDADES DOS MATERIAIS COMPÓSITOS.....	25
3.4 ANÁLISES EM ELEMENTOS FINITOS .....	28
3.4.1 CARACTERÍSTICAS DE CADA MODELO ESTRUTURAL .....	30
3.4.2 METODOLOGIA DE COMPARAÇÃO .....	31
<b>4 RESULTADOS E DISCUSSÕES</b> .....	<b>34</b>
4.1 PRIMEIRO MODELO ESTRUTURAL .....	36
4.2 SEGUNDO MODELO ESTRUTURAL.....	39
4.3 TERCEIRO MODELO ESTRUTURAL .....	41
<b>5 FABRICAÇÃO E OUTRAS DISCUSSÕES</b> .....	<b>45</b>
5.4 FABRICAÇÃO DA CAIXA DO VAGÃO .....	45
5.1 O PROBLEMA DA LONGARINA CENTRAL NO VAGÃO EM COMPÓSITO.....	47
5.2 AS TREMONHAS E ESCOTILHAS.....	49
5.3 FABRICAÇÃO DOS ARRANJOS ESTRUTURAIS E SUAS DISCUSSÕES .....	50
<b>6 DEGRADAÇÃO E MANUTENÇÃO DOS COMPÓSITOS</b> .....	<b>53</b>
<b>7 ANÁLISE DE CUSTO DO VAGÃO</b> .....	<b>55</b>

7.1 CUSTO DOS MATERIAIS DA CAIXA DO VAGÃO .....	55
7.2 REDUÇÃO DO CONSUMO DE DIESEL.....	60
<b>8 CONCLUSÃO .....</b>	<b>63</b>
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>65</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Nas décadas de 1980 e 1990 houve recessão na indústria ferroviária e os investimentos no setor só voltaram após 1997, com as concessões governamentais. Privatizadas as ferrovias, as operadoras ferroviárias buscaram obter mais lucro nos serviços de transporte. Apesar disso, a indústria ferroviária não sofreu os avanços esperados. Para König e Hecht (2012), o mercado ferroviário não deu atenção suficiente para melhorar a qualidade do transporte de cargas nas últimas décadas, usando novas tecnologias e articulações logísticas. Os autores ainda detalham futuras medidas para um novo crescimento no transporte ferroviário, entre as quais:

- Redução da emissão de ruído: problema recorrente do transporte ferroviário, havendo reclamações nas passagens pelos centros urbanos;
- Veículos ferroviários mais leves: possibilita aumento da carga útil transportada e economia de energia;
- Redução do tempo de transporte: aumentar a produtividade de um vagão, reduzir tempo de carga e descarga, aumentar a velocidade do transporte e sua confiabilidade;
- Aumentar a capacidade logística: Através de portos ferroviários que integram outros modais de transporte. E melhorar a administração dos dados de transporte para otimização do alcance logístico do transporte ferroviário, também, integrando outros modais.

O presente trabalho se insere neste contexto propondo a redução de peso dos vagões que resultará em uma maior eficiência energética dos trens. De modo geral a eficiência de um comboio ferroviário pode ser melhorada aumentando o rendimento dos motores na locomotiva ou diminuindo as forças de atrito nos vagões e carros motores. Todas as forças de atrito, com exceção da resistência aerodinâmica, são dependentes da massa. Logo, reduzindo a massa, menos energia é dissipada e reduz-se o consumo de combustível. Como exemplo, em 2010, a Ferrovia Tereza Cristina desenvolveu um

vagão feito de plástico reciclável que obteve a redução de uma tonelada e meia do peso tara do vagão, aumentando assim, o número de carga útil (COLONETTI et al., 2015). Entretanto, plásticos em geral apresentam muitas limitações quando se trata de propriedades mecânicas.

Portanto, a principal justificativa deste trabalho é a redução de peso de um vagão para aumentar a eficiência energética dos trens sem reduzir a resistência mecânica. Para tal, a solução escolhida foi a utilização de materiais compósitos. Os compósitos são materiais que permitem combinar propriedades mecânicas de reforços e matrizes para melhorar o desempenho em aplicações específicas. Desta maneira, consegue-se sistemas com menor peso, alta rigidez, estabilidade estrutural e elevada resistência a corrosão (BRUNELLI, 2012).

A corrosão é outro ponto a ser destacado. De acordo com Oliveira (2009), as cargas de graneis como cereais, açúcar e minério trazem problemas para a estrutura dos vagões convencionais, pois são corrosivas exigindo maior frequência de manutenção. Deste modo, estruturas em compósitos podem ser vantajosas reduzindo a quantidade de manutenção ao longo da vida útil.

Pelo fato dos materiais compósitos apresentarem facilidade em fabricação de geometrias complexas, uma nova geometria estrutural de vagão foi proposta. Esta nova geometria foi baseada em um vagão Hopper convencional que possui escotilhas superiores para a entrada dos grãos e tremonhas inferiores para o descarregamento dos grãos. No entanto, a geometria proposta possui linhas mais suaves distribuindo melhor as concentrações de tensões e tornando-a complexa.

Três arranjos estruturais foram propostos para a nova geometria do vagão. Através de normas e condições de carregamento, os três arranjos estruturais foram analisados utilizando o método de elementos finitos. O método de elementos finitos é uma forma de analisar um modelo geométrico estrutural sem a necessidade de testes experimentais. Assim, como o vagão graneleiro em compósitos não é um projeto idealizado, o método de elementos finitos é uma ferramenta interessante para testar diferentes tipos de arranjos sem a necessidade de prototipagem.

Após as análises em elementos finitos, uma discussão crítica foi desenvolvida a fim de comparar os arranjos estruturais e os problemas em uma eventual fabricação. Para

finalizar este trabalho, também foi discutido sobre degradação e custos devido a utilização dos materiais compósitos.

## 1.1 OBJETIVOS

O objetivo geral é analisar três conceitos estruturais de um vagão em materiais compósitos. Estes novos conceitos têm como finalidade reduzir a tara do vagão.

Para conseguir o objetivo geral, quatro objetivos específicos foram definidos:

- Modelar uma geometria para o vagão graneleiro em compósitos de forma que esta possua o volume igual ou maior a um vagão Hopper de bitola larga. Além disso, que sua geometria aproveite a facilidade de fabricação dos compósitos em geometrias complexas usufruindo de regiões com menores concentrações de tensão;
- Buscar em normas as condições de contorno para a análise em elementos finitos;
- Analisar três arranjos estruturais do vagão em compósitos, através do método de elementos finitos utilizando as condições e contorno estabelecidos;
- Discutir os resultados das análises dos arranjos estruturais, propondo otimizações e criando um debate crítico sobre as formas de fabricação e outras discussões relacionados a um vagão graneleiro em compósitos.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo serão apresentados conceitos que ajudam a compor o conhecimento e a motivação para o projeto do vagão em compósitos. Estes conceitos se referem a vagões e materiais compósitos.

### 2.1 VAGÕES

Entre os materiais rodantes da via férrea, podemos classificar os veículos que tracionam e os que são tracionados. Os vagões se incluem nos tracionados e são utilizados para transportar cargas. Segundo a Confederação Nacional do Transporte (CNT, 2017), há 100.715 vagões de concessionárias em operação no país. Para mostrar a produção brasileira de vagões, foi plotado o Gráfico 1 com os dados da Associação Brasileira da Indústria Ferroviária (ABIFER, 2017),

Gráfico 1 – Unidades de vagão produzidas no Brasil por quinquênio



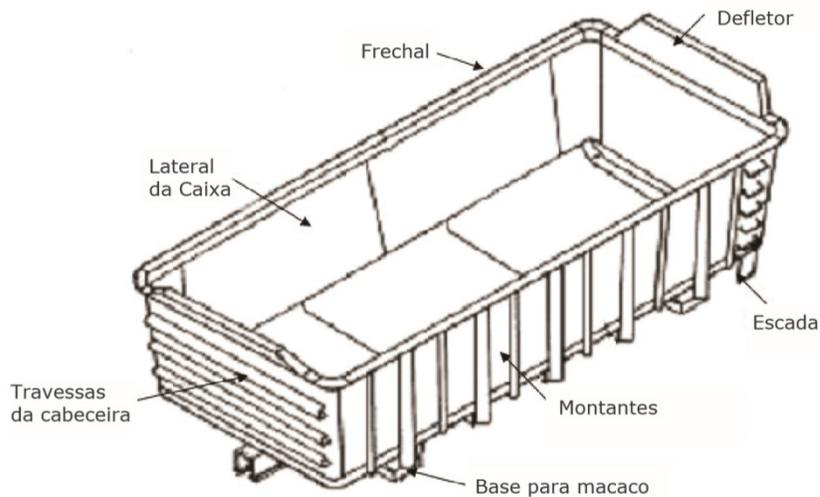
Fonte: Elaborado pelo Autor (2018) com dados da ABIFER (2017).

Com base nos dados do Gráfico 1, nota-se a decadência da produção de vagões nas décadas de 1980 e 1990, como citado na Introdução. Também pode-se observar o crescimento da produção a partir de 1997, com as privatizações das ferrovias.

### 2.1.1 Estrutura e Infraestrutura de Vagões

A estrutura do vagão pode ser dividida em superestrutura e infraestrutura. A superestrutura é a caixa ou plataforma do vagão responsável pela segurança da carga transportada, conforme mostrado na Figura 1. Os materiais usados na construção da superestrutura devem ser resistentes a corrosão o que permite maior vida útil (BRUNORO, 2008).

Figura 1 – Superestrutura de um vagão de carga.



Fonte: Pimassoni, (2010, p.8).

A infraestrutura do vagão de carga pode ser definida como a estrutura que suporta as cargas da superestrutura e os choques e trações provenientes dos veículos conectados no comboio, assim, possibilitando o movimento do vagão nos trilhos. É composta de truque, aparelho de choque e tração, sistema de freio e engate. (QUINTINO, 2008).

### 2.1.2 Reforçadores nas Caixas dos Vagões

Em vagões convencionais em aço, é comum verificar ao longo de suas paredes, reforços com perfis soldados verticalmente. Os vagões Hopper geralmente possuem perfis quadrados em todo o seu corpo, desde as paredes até as tremonhas. Nos Hoppers, também são comuns estes perfis serem soldados internamente.

Já o Gôndola, vagão mais utilizado para transporte de minério, possui reforços de chapas de maior espessura com momento de inércia relativamente mais elevado em suas paredes laterais em comparação com outros vagões. Esta característica é consequência da sua descarga ser feita através de viradores de vagão, em que as paredes laterais suportam toda carga de minério durante a rotação da caixa.

Ilustrando estes reforçadores, a Figura 2 mostra os perfis de reforços ao longo dos vagões Hopper e Gôndola.

Figura 2 – Reforçadores no vagão Hopper e vagão Gôndola



Fonte: GBMX (2018) Adaptada.

Na Figura 2 é possível observar o uso de reforçadores externos nos vagões Hopper e Gôndola. O conceito de reforçador também tem utilidade na construção do arranjo estrutural do vagão em compósito, onde ao longo do corpo é necessário possuir reforços que aumente a rigidez global da caixa.

### 2.1.3 Geometria baseada neste trabalho

Neste trabalho a geometria do vagão foi modelada tendo em conta os seguintes princípios:

- Geometria viável para fabricação em compósitos utilizando linhas suaves;
- Os grãos serem carregados e descarregados com facilidade e rapidez no vagão;
- O volume do vagão ser próximo a um vagão Hopper de bitola larga.

Para isso, a caixa do vagão deste trabalho se apoia nos conceitos adotados pelo modelo do vagão Hopper mostrado na Figura 3:

Figura 3 – Vagão Hopper da Greenbrier Maxion.



Fonte: GBMX (2018)

Este modelo de vagão é difundido no transporte ferroviário de grãos. Seu teto possui escotilhas onde é feito o carregamento. E na sua parte inferior, as tremonhas facilitam o escorregamento dos grãos no processo de descarga. Estas características tornam o Hopper a melhor opção para um vagão graneleiro pois possui boa velocidade de carga e descarga, sem necessitar de virador de vagão.

## 2.2 MATERIAIS COMPÓSITOS

“De maneira geral, um compósito pode ser considerado como qualquer material multifásico que exibe uma proporção significativa das propriedades de ambas as fases que o constitui de modo tal que é obtida uma melhor combinação de propriedades.” (CALLISTER, 2007, p. 423).

Os compósitos variam as propriedades mecânicas segundo as direções, como por exemplo, um laminado de fibra com resina terá alta resistência na direção da fibra, e baixa na direção transversal. Diferentemente dos metais que são considerados materiais isotrópicos, o que significa que suas características mecânicas são iguais em todas as direções. Por isso, geralmente as estruturas em compósitos são constituídas de várias camadas em diferentes direções. (SHIGLEY; MISCHKE; BUDYNAS, 2005).

“A característica anisotrópica e a possibilidade de formular os laminados com as propriedades mecânicas adequadas para cada aplicação torna os compósitos um material de engenharia estratégico para aplicações estruturais.” (CARVALHO, 2014, p. 7). Segundo Shigley (2005), razões 5 vezes mais de resistência por peso e até 8 vezes mais rigidez por peso pode ser conseguida com compósitos em comparação com aços de alta resistência.

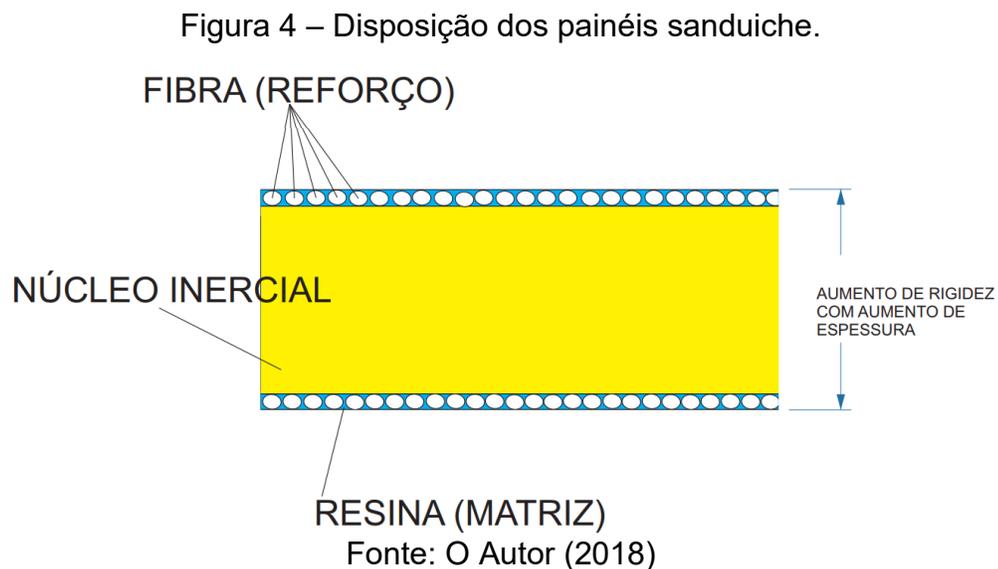
É importante considerar que, atualmente, quase todos os vagões são feitos de aço, por isso, utilizar materiais compósitos se torna um desafio. “A utilização de compósitos em engenharia, assim como qualquer nova tecnologia de material, teve que vencer as barreiras das tecnologias consolidadas, no caso, a mentalidade de projeto de componentes metálicos” (ANGELICO, 2009, p.7).

Têm-se dificuldades a serem vencidas para essas novas tecnologias de materiais no que diz respeito à previsão do comportamento mecânico. De forma que, atualmente, as potencialidades desses materiais não são amplamente exploradas, por isso, acarretando em elevados coeficientes de segurança. (ANGELICO, 2009, p.8).

A análise estrutural desse material é mais complexa, tendo em vista que para cada camada de compósitos é preciso determinar 4 constantes. São estas: Módulo de Young na direção longitudinal e transversal a fibra, Módulo de Cisalhamento e a razão de Poisson. (SHIGLEY et al., 2005).

### 2.2.1 Painéis sanduíche

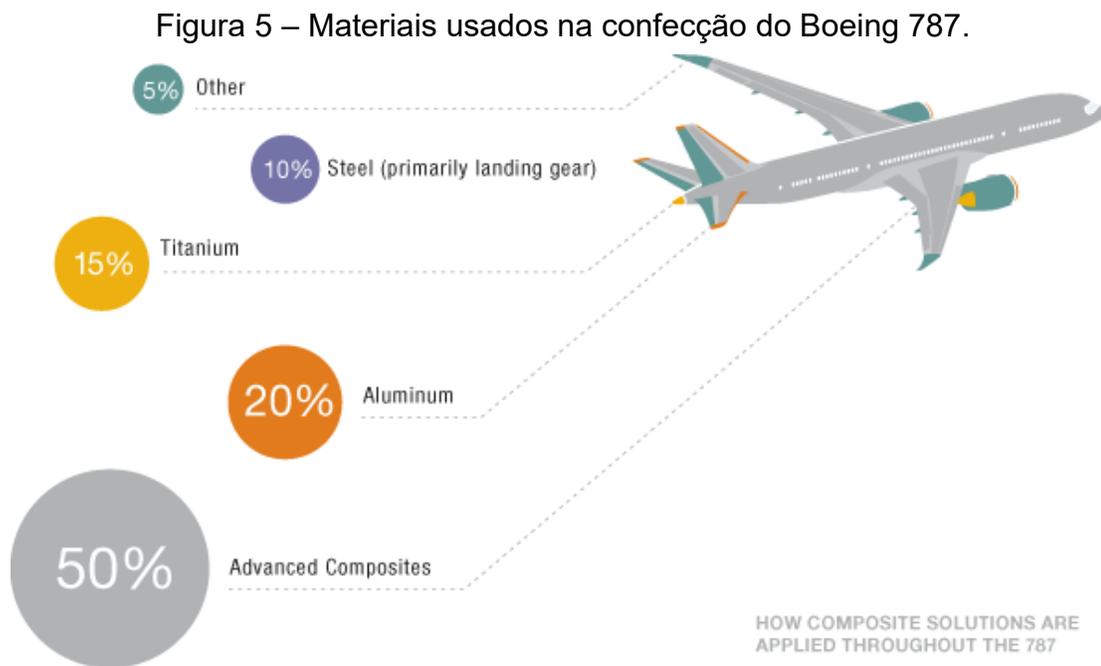
Os materiais compósitos que constituem este trabalho são a fibra de vidro, resina epóxi e núcleo inercial. O núcleo inercial é um material menos rígido utilizado com objetivo de aumentar a espessura da chapa de compósitos. Geralmente, madeiras, polímeros expandidos e espumas são utilizadas como material de núcleo. Estão, com a fibra de vidro, resina epóxi e núcleo inercial é constituído os painéis sanduiche que irão compor o corpo da caixa do vagão. A Figura 4, ajuda a entender melhor a organização de um painel sanduiche.



Os Painéis sanduiches são difundidos na fabricação de estruturas planas, em compósitos, que sofrem principalmente cargas de flexão. A sua vantagem parte do princípio de que os maiores níveis de tensão de flexão localizam nas extremidades do material. Então sua organização propõe o material mais rígido (a fibra) se localizar nas extremidades e seu material menos rígido se localizar no centro. Este tipo de estrutura pode ser encontrado facilmente na natureza, como por exemplo no modelo estrutural dos ossos, onde a calcificação se localiza nas extremidades e no seu interior contém um material esponjoso onde se localiza a medula.

### 2.2.2 Materiais Compósitos Aplicados nas Outras Indústrias

Redução de peso sempre foi requerida em projetos de veículos de transporte, pois influencia o consumo de energia. Nos projetos da indústria aeronáutica esta busca por leveza é intensificada. Podemos citar o Boeing 787 Dreamliner que foi o primeiro grande jato comercial a ter fuselagem, asas, estrutura da fuselagem e outras partes em compósitos (MARSH, 2014). A Figura 5 mostra as partes do avião e os materiais utilizados, evidenciando a grande parte em compósitos (50% compósitos, 20% alumínio, 15 % titânio, 10% aço e 5% outros).



Fonte: Hale (2006).

Segundo a Hale (2006), a redução de peso do 787 foi de 20 % em relação a projeto convencionais de aviões do mesmo tamanho em alumínio. Tendo como uma das vantagens a redução de manutenção pela maior resistência à fadiga dos compósitos em relação ao alumínio utilizado em projetos convencionais. Para Covington (2011) esta redução de peso deixou o 787 20% mais eficiente do que os aviões de mesmo tamanho.

Na indústria automotiva, Holbery e Houston (2006), apontaram o uso de compósitos como fibras naturais com termoplástico e matrizes termo endurecidas. Os

autores ainda comparam as fibras naturais com fibras de vidro já utilizadas nesta indústria. Na Figura 3 podem ser observados vários componentes no carro feitos de compósitos.

Figura 6 – Componentes de compósitos e fibras naturais do Mercedes E-Class.



Fonte: Edmunds (2009).

As fibras naturais, ilustradas na Figura 6, foram intensificadas na confecção dos carros após as normas de vários países aumentarem o rigor quanto a porcentagem do veículo que deveria ser reciclável (HOLBERY; HOUSTON, 2006).

Na construção de embarcações de lazer o uso de materiais compósitos é ainda mais evidente. Estes materiais proporcionam o aprimoramento estético e redução de custos de manutenção nestas embarcações (OWENS CORNING, 2015). A Figura 7 apresenta um barco sendo construído pelo processo de infusão.

Figura 7 – Construção de barco em compósito.



Fonte: Vatalaro (2016).

Na Figura 7 pode ser observada, a resina no fundo escoando para cima no casco do barco. Este processo é chamado Infusão, utiliza vácuo como trabalho, é mais rápido que os processos convencionais e segundo Vatalaro (2016) não contamina o ar do ambiente de trabalho.

Na geração de energia eólica, segundo Campos (2013), as pás são feitas de fibra de vidro e fibra de carbono em matrizes de resina epóxi, poliéster e ester-vinílica. A Figura 8 mostra união de duas pás eólicas em compósitos.

Figura 8 – Junção de duas partes de uma pá eólica.



The two shells of a 60kW blade being joined

Fonte: ETABLADES (2017).

Na Figura 8 pode ser observada a complexidade da geometria da pá eólica. Campos (2013), ainda ressaltava a importância dos compósitos que facilita na fabricação das geometrias complexas além dos requisitos mecânicos, leveza e resistência à fadiga necessários em uma pá eólica.

Na confecção de metrô não é diferente, segundo Helms e Lambrecht (2007), reduzindo 100 kg de um trem de alta velocidade salvaria cerca de 100 GJ de energia durante toda sua vida útil. Wennberg (2011) propôs reduzir em torno de 4 toneladas de um trem utilizando materiais compósitos o que em uma relação linear salvaria 4000 GJ. A Figura 9 mostra o Trem Alstom ETR 675 que se beneficiou com o uso de compósitos.

Figura 9 – Trem Alstom ETR 675, feito em compósitos.



Fonte: DIABGROUP (2017).

Segundo Diabgroup (2017), os núcleos inerciais utilizados na confecção do ETR 675 (mostrado na Figura 6) reduziu o peso mantendo a rigidez. O autor ainda destaca que os compósitos usados no trem possibilitaram atender as rigorosas normas EM 45545-2 em relação à inflamabilidade e toxicidade dos trens em toda Europa.

### 2.2.3 Materiais Compósitos Aplicados em Vagões de Carga.

São escassos na literatura trabalhos que se referem ao uso de materiais compósitos aplicados em vagões de carga. O primeiro trabalho encontrado foi de Oliveira (2012), que teve como objetivo projetar um vagão em compósitos para transportar minério e grãos. O projeto não foi concluído.

O segundo, registrado no trabalho de Baier e Majzner (2012), analisa o uso de compósitos em vagões de cargas. Feitos testes experimentais, foi concluído que é possível utilizar compósitos nas paredes dos vagões. Sugeriram, para próximos estudos experimentais, analisar os painéis experimentalmente variando as espessuras dos materiais.

O terceiro projeto de vagão encontrado, utiliza plástico reciclável para substituir placas de madeira que são utilizadas nos vagões GHD transportadores de carvão na Ferrovia Tereza Cristina. Utilizando o polietileno de alta densidade reciclável, foi possível

uma redução de 1,5 toneladas do peso do vagão, diminuição do custo do vagão, redução do ruído e aumento da confiabilidade da frota (COLONETTI et al., 2015).

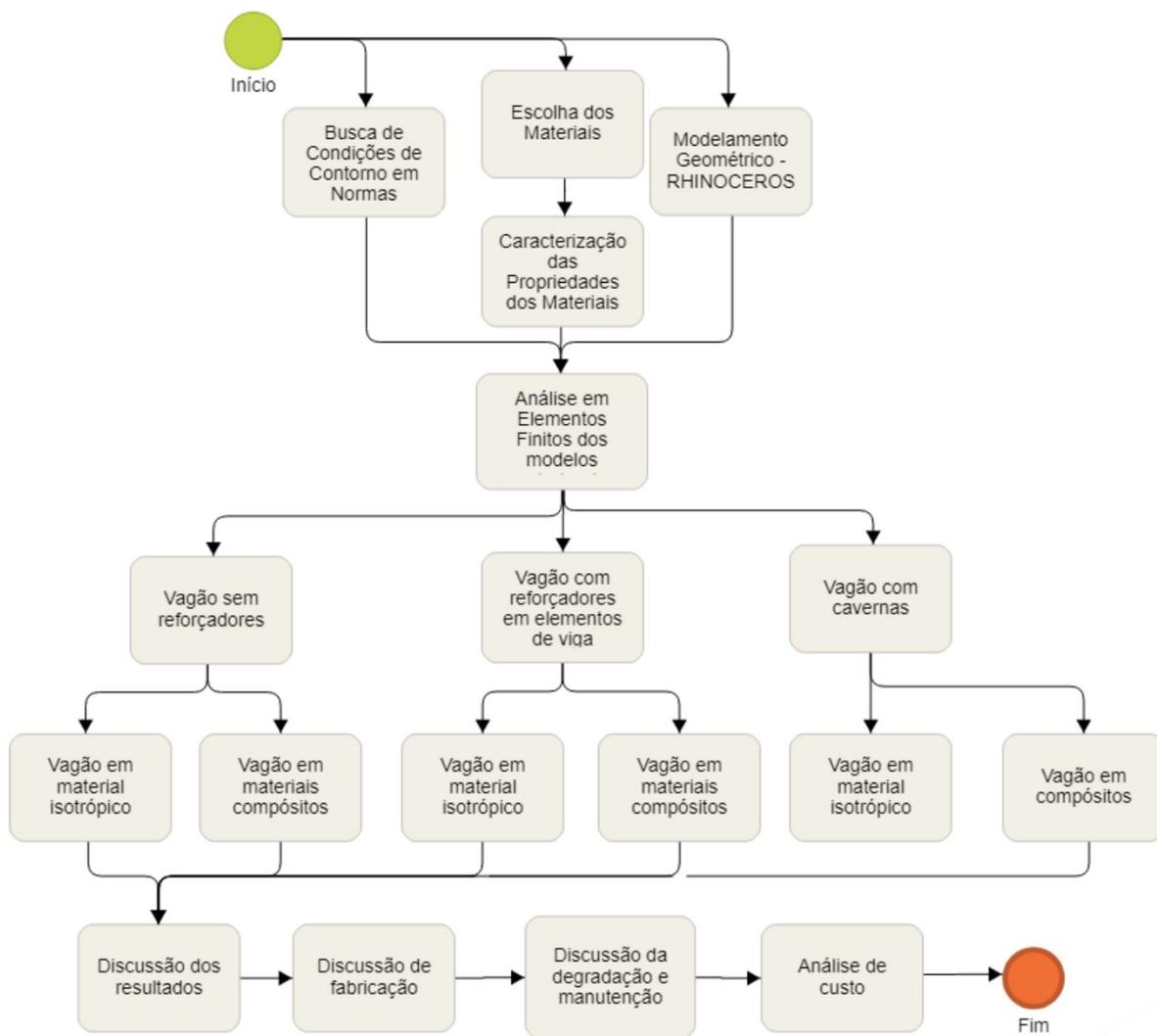
Já o trabalho de Sergeichev (2014), se assemelha à proposta deste trabalho, pois além de modelar um vagão Hopper em fibra de vidro em material sanduiche, também simulou as cargas estáticas e dinâmicas e o escoamento da resina no modelo para aperfeiçoar o processo de fabricação por infusão.

Com as buscas na literatura, pode-se afirmar que os materiais compósitos estão bem difundidos nos segmentos da indústria automotiva, energia eólica, trens de alta velocidade, naval e principalmente no segmento aeronáutico. É também percebido que existem poucos trabalhos na literatura aplicando os compósitos no transporte de cargas, o que fortalece a motivação deste trabalho no conceito de inovação.

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

Conforme discutido anteriormente, este trabalho propõe uma caixa de vagão graneleiro em materiais compósitos, com objetivo de reduzir peso. Para tal, uma metodologia foi desenvolvida e ilustrada na Figura 10.

Figura 10 – Mapa de processos da Metodologia.



Fonte: O Autor (2018)

Como mostrado na Figura 10, o primeiro passo deste trabalho foi definir as condições de carga utilizadas para projetar vagões, modelar a geometria do vagão e caracterizar os materiais compósitos. Todos estes itens foram utilizados para alimentar a análise em elementos finitos.

Para aplicar as condições de contorno, foi utilizado a norma de projeto estrutural da AAR (America Association of Railway). Já os materiais compósitos foram caracterizados de acordo com equações estabelecidas em normas. E então, a modelagem da casca do vagão foi feita em superfície utilizando o software RHINOCEROS. Por fim, o modelo foi importado para o software ABAQUS, utilizado por este trabalho para fazer as análises. Todos os detalhes desta metodologia serão retratados neste capítulo.

### 3.1 CONDIÇÕES DE CARGA UTILIZADAS EM PROJETOS DE VAGÃO

Para alimentar as condições de carga da análise, foi utilizado o capítulo 4 da norma AAR Section C Part II (AAR, 2015), disponibilizado pela empresa Greenbrier Maxion. Este capítulo trata do projeto estrutural, no que diz respeito as cargas estáticas, não levando em conta a análise de fadiga. Portanto, o modelo da caixa do vagão deste trabalho foi submetido a cargas estáticas. A análise em fadiga e as cargas devido aos impactos não participará do escopo, sendo esta análise posterior a este trabalho.

O modelo graneleiro deste trabalho, se equipara ao tipo de vagão Hopper. Segundo a norma AAR (2015), as cargas atuantes na caixa do Hopper, podem ser calculadas como um carregamento distribuído do peso de carga em suas paredes. Esta carga, matematicamente, em módulo e vetor se equipara a pressões hidrostáticas onde o peso específico do fluido seria o peso específico da carga.

A soja, grão mais utilizado no transporte dos vagões graneleiros no Brasil, possui  $720 \text{ kg/m}^3$  de densidade média. O açúcar, também muito transportado nos vagões do país, possui peso específico de  $850 \text{ a } 950 \text{ kg/m}^3$  (CAMPER, 2016). No entanto, por maior segurança, foi definido utilizar no carregamento a densidade da água, considerada  $1000 \text{ kg/m}^3$ .

Outro ponto considerado na composição da carga, foi o fator de segurança. A AAR (2015) determina um fator de segurança de 1.8 da tensão de escoamento ou da tensão de flambagem, a que for menor. Porém, é levado em conta que a AAR considera que o vagão é feito em aço. Por outro lado, a Sociedade Classificadora DNV (Det Norske Veritas), que regulariza projetos de cascos de barcos em laminado de fibra de vidro, define que a tensão máxima de projeto deve ser considerada como, 30% da tensão de ruptura do material o que gera um fator de segurança de 3,33. Por medida de segurança, neste trabalho foi utilizado como fator de segurança a DNV, ou seja, o critério de falha mais conservador. Além de que a DNV se assemelha a este projeto em questões do uso de compósitos.

Para formular o carregamento, foi utilizado considerando que:

- O vagão está carregado em todo seu espaço interno;
- O sentido da gravidade está apontado para o chão, portanto,  $h$  é zero na altura máxima do vagão e cresce linearmente até seu valor máximo no fundo do vagão.

Com estas condições, temos que o carregamento de pressões dependente da altura é:

$$P(h) = \rho \cdot g \cdot h \text{ [MPa]} \quad (1)$$

A Tabela 1 mostra os valores de cada parâmetro considerado:

Tabela 1 – Valores para cálculo do carregamento.

Parâmetro	Valor [unidade]
$\rho_{\text{água}}$ (densidade da água)	1000 [kg/m <sup>3</sup> ]
$g$ (gravidade)	9,82 [m/s <sup>2</sup> ]
$h_{\text{vagão}}$ (altura do vagão retirada da geometria)	3,2 [m]
$P(h)_{\text{máximo}}$	31500 [Pa]

Fonte: O Autor (2018)

Portando, estes parâmetros foram utilizados para alimentar o carregamento de pressão da carga no software ABAQUS. Em seguida, a geometria do vagão foi modelada.

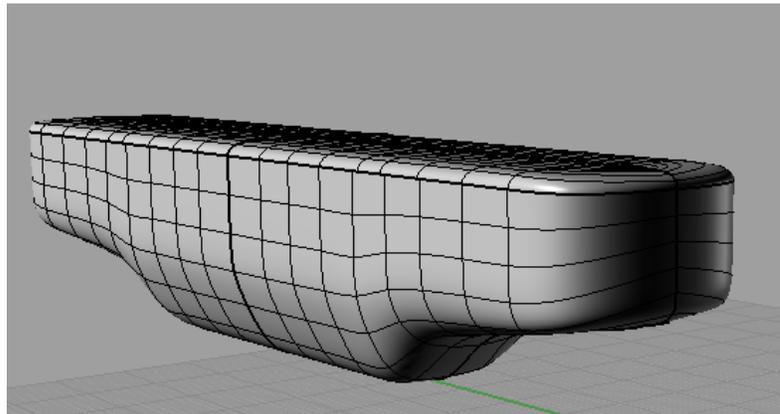
### 3.2 GEOMETRIA

Para adequar a caixa do vagão, em sua fabricação, foi tomado como modelo as geometrias dos barcos de materiais compósitos. Estas embarcações são fabricadas em moldes onde acontecem a impregnação da resina nos reforços. Neste processo os tecidos de fibra se adequam facilmente em moldes fabricados com geometrias suaves, o que viabiliza a fabricação de superfícies complexas. Além de fornecer formatos complexos, as geometrias com linhas suaves são propensas a ter menos concentração de tensão do que geometrias quadradas.

Com estas considerações, linhas suaves foram utilizadas para modelar a caixa, tornando a geometria propensa a melhor distribuição de tensões em suas paredes em comparação aos vagões convencionais.

Com estas observações, este trabalho propôs a geometria da caixa do vagão mostrada na Figura 11.

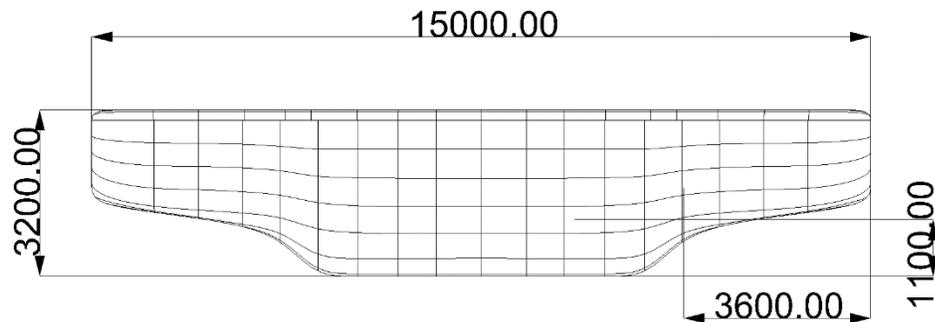
Figura 11 – Casca do vagão modelada no RHINOCEROS.



Fonte: O Autor (2018)

As dimensões máximas da geometria foram baseadas nas dimensões do vagão HFT da frota da RUMO (2015). A Figura 12 mostra uma vista lateral do vagão cotado com suas dimensões principais.

Figura 12 – Vista lateral do vagão cotada [mm].



Fonte: O Autor (2018)

As dimensões de 3600 mm e 1100 mm permitem a alocação do truque do vagão nas extremidades da caixa. A Tabela 2 mostra as características do volume do casco

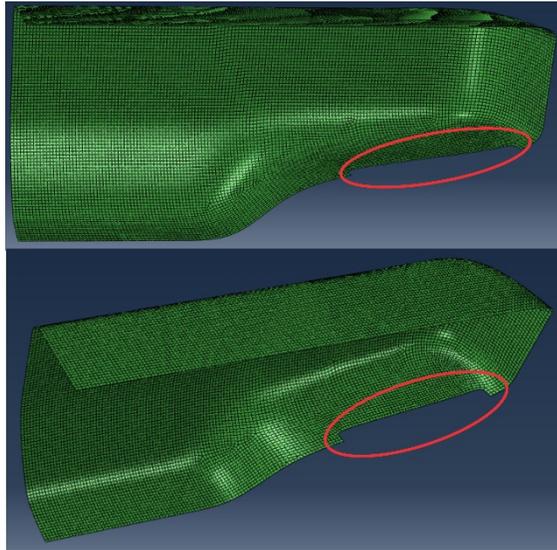
Tabela 2 – Características da geometria do vagão.

Área da superfície do vagão	$A_{\text{vagão}} =$ 155,5 [m <sup>2</sup> ](sem caverna) e 198,5 [m <sup>2</sup> ](com cavernas)
Volume	105 [m <sup>3</sup> ]
Carga transportada em soja	75,60 toneladas
Carga transportada de açúcar cristal	99,75 toneladas
Carga transportada de água	105 toneladas

Fonte: O Autor (2018)

Para diminuir o custo computacional da análise, foi definido utilizar apenas um quarto do modelo do vagão, considerando que toda sua geometria e carregamento são simétricos. A Figura 13 mostra o modelo utilizado nas análises.

Figura 13 – Modelo simétrico do vagão.

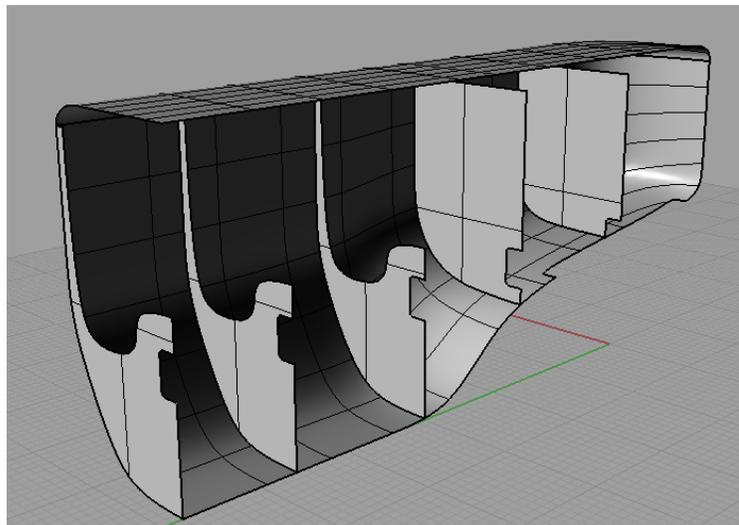


Fonte: O Autor (2018)

Na Figura 13, é possível verificar na geometria, o rasgo no chão onde passa a longarina central (circulado de vermelho). Este rasgo foi utilizado para aplicar as condições de contorno de deslocamento e rotação igual a zero.

Também foi modelado o vagão com cavernas, utilizado no terceiro período de análises que será abordado nos próximos capítulos. A Figura 14 mostra o modelo do vagão com cavernas.

Figura 14 – Modelo simétrico do vagão com cavernas.



Fonte: O Autor (2018)

Com as geometrias do vagão com e sem cavernas modeladas, os materiais compósitos e suas propriedades mecânicas foram estabelecidas.

### 3.3 PROPRIEDADES DOS MATERIAIS COMPÓSITOS

A Fibra de vidro escolhida foi do tipo S-2 Glass® Fibers. A resina escolhida foi epóxi e o núcleo inercial definido foi o Klegecell® núcleo de PVC expandido da empresa DIAB. As propriedades mecânicas da fibra e resina estão listadas na Tabela 3 e as propriedades do núcleo estão na Tabela 4.

Tabela 3 – Propriedades da fibra e da resina.

Materiais X Propriedades	Fibra de Vidro	Resina Epóxy
Módulo de Elasticidade Longitudinal [MPa] Transvesal [MPa]	85500	4500
	85500	
Módulo de Cisalhamento [Mpa]	35000	1600
Coeficiente de Poisson	0,23	0,35
Tensão de Ruptura	4890	130
Massa específica [kg/m <sup>3</sup> ]	$\rho_f = 2460,00$	$\rho_m = 1200,00$

Fonte: AGY (2018) e Pereira (2005)

Tabela 4 – Propriedades no núcleo inercial.

CoreLite Board® Closed-Cell PVC Foam	Valores
Densidade	$\rho_{núcleo} = 200 \text{ [kg/m}^3\text{]}$
Tensão de Ruptura por Tração	8 [MPa]
Módulo de Elasticidade	290 [MPa]
Alongamento	26 %
Coefficiente de Poisson	0,32
Tensão de Compressão	6,6 [MPa]
Módulo de Compressão	600 [MPa]
Tensão de Cisalhamento	4 [MPa]
Módulo de Cisalhamento	115 [MPa]
Força de Destacamento	299,1 [kN/m]

Fonte: DIAB (2018)

Neste trabalho, por simplificação, foi definido utilizar apenas uma direção de laminado para cada lado do painel. Portanto, o tecido utilizado na composição do laminado possui trama unidirecional.

Para os cálculos dos módulos de elasticidade foram consideradas as seguintes hipóteses:

- As fibras são uniformemente distribuídas internamente na matriz;
- Existe uma adesão perfeita entre a fibra e a matriz;
- Não há vazios e bolhas no laminado;
- A lâmina, inicialmente, se encontra em estado de esforço nulo (não há tensões residuais);
- Tanto a fibra quando a matriz se comporta no modo linear.

Cada lâmina, contém propriedades mecânicas em determinadas direções. Estas propriedades, são calculadas a partir das características mecânicas da fibra e da resina. Para caracterizar estas propriedades, foram utilizadas equações de lâminas unidirecionais retiradas do livro de Pereira (2005) e da DNV (2018). São estas:

$$\varphi = \frac{\psi}{\psi + (1 - \psi) \frac{\rho_f}{\rho_m}} \quad (1)$$

$$E_{11} = E_{FL} \cdot \varphi + E_m \cdot (1 - \varphi) [MPa] \quad (2)$$

$$E_{22} = \frac{E_m}{1 - v_m^2} \frac{1 + 0,85\varphi^2}{(1 - \varphi)^{1,25} + \varphi \frac{E_m}{E_{ft}(1 - v_m)^2}} [MPa] \quad (3)$$

$$G_{12} = G_m \frac{1 - 0,8\varphi^{0,8}}{(1 - \varphi)^{1,25} + \frac{G_m}{G_f} \varphi} [MPa] \quad (4)$$

$$v_{12} = \varphi \cdot v_f + (1 - \varphi)v_m [MPa] \quad (5)$$

$$G_{13} = G_{12} [MPa] \quad (6)$$

$$G_{23} = \frac{E_{22}}{2(1 + v_m)} [MPa] \quad (7)$$

onde  $\varphi$  e  $\psi$  são as frações volumétrica e mássica da fibra no laminado;  $\rho_f$  e  $\rho_m$  são as densidades da fibra e da matriz;  $E_{FL}$  e  $E_{ft}$  são os módulos de elasticidade longitudinal e transversal da fibra;  $E_m$  é o modulo de elasticidade da matriz;  $E_{11}$  e  $E_{22}$  são os módulos longitudinal e transversal do laminado;  $v_{12}$ ,  $v_m$  e  $v_f$  são os coeficientes de Poisson do laminado, da matriz e da fibra;  $G_m$  e  $G_f$  são os módulos de cisalhamento da matriz e da fibra e  $G_{12}$ ,  $G_{13}$  e  $G_{23}$  são os módulos de cisalhamento do laminado em suas devidas direções.

A partir destas equações, foram obtidas as propriedades das lâminas. A Tabela 5 apresenta o resultado das propriedades.

Tabela 5 – Valores das propriedades da lâmina calculada com as equações.

Propriedades	Valor
$\varphi$	0,42
$\psi$	0,6
$E_{11}$	38725,00 [MPa]
$E_{22}$	11210,36 [MPa]
$G_{12}$	1831,73 [MPa]
$G_{13}$	1831,73 [MPa]
$G_{23}$	4152 [MPa]
$\nu_{12}$	0,3

Fonte: O Autor (2018)

Com estas propriedades, foram caracterizadas as lâminas de fibra de vidro com resina epóxi. Este resultado foi utilizado na definição do material no software ABAQUS. Finalmente, com as condições de contorno, geometria e materiais definidos, a análise em elementos finitos pôde ser feita.

### 3.4 ANÁLISES EM ELEMENTOS FINITOS

Neste subcapítulo será apresentada a metodologia desenvolvida para analisar as condições de carga nos modelos estruturais propostos. Como já citado na Introdução, as análises foram feitas utilizando o método de elementos finitos com objetivo de testar diferentes arranjos estruturais sem a necessidade de prototipagem.

Para iniciar as análises, a geometria em superfície foi importada para o ABAQUS onde foi convertida em uma malha de elementos de casca. Este elemento possibilita variar parâmetros como espessura, quantidade de lâminas, suas direções e propriedades.

Como condições de contorno, foram definidos deslocamento e rotação nulos na linha de engaste onde passa a longarina central. Este tipo de consideração na prática não é real, pois se considera que a longarina é indeformável. Por efeito, esta ponderação

gera elevadas tensões nos elementos próximos ao engaste. Em decorrência disto, foi definido retirar o resultado de 4 elementos após a linha de engaste no primeiro e segundo período de análises.

É importante destacar que as análises foram feitas pelo método linear. Ou seja, foi considerado que as cargas aplicadas não variam as direções de acordo com a deformação da geometria ao longo do tempo. Assim, a deformação da estrutura também não varia a rigidez do corpo analisado. Outro ponto considerado na análise foi que os materiais utilizados estão no regime elástico.

Nas análises com material isotrópicos, foi definido como material um aço estrutural com 200 GPa de módulo de elasticidade. E a espessura utilizada foi de 5 mm, pois é a espessura aproximada da chapa de bitola 3/16" utilizada na fabricação destes vagões.

Nas análises em compósitos, foi definido em todos os arranjos estruturais uma espessura de núcleo padrão de 50 mm ( $D_{núcleo} = 50 \text{ mm}$ ). Essa espessura constante facilitou simplificar os números de combinações existentes ao utilizar um material sanduiche. Portanto, somente foi variada a espessura da lâmina de fibra.

Uma tensão de projeto foi definida através do fator de segurança aplicado a um valor de tensão de ruptura de testes experimentais da DNV (2016). Com estes testes foram obtidas as tensões de ruptura de quatro tipos de tramas de tecido de fibra de vidro. A trama unidirecional, definida para este projeto, obteve 650 MPa, maior valor nos testes. No entanto, por segurança de projeto, foi escolhido utilizar o valor da trama quadriaial (300 MPa), menor valor nos testes da DNV (2016). Aplicando o fator de segurança de 30% da tensão de ruptura definido pela DNV (2016), têm-se a tensão admissível de 90 MPa. E então, através de iterações nos modelos estruturais, foi variada a espessura das lâminas até conseguir uma tensão longitudinal abaixo de 90 MPa.

O deslocamento máximo também foi avaliado e discutido em cada modelo, pois seu valor pode significar a rigidez global da caixa do vagão. A seguir, são apresentadas as características de cada período de análise.

### 3.4.1 Características de Cada Modelo Estrutural

Foram analisados três modelos estruturais. Cada modelo é o estudo de um arranjo estrutural. O primeiro modelo utiliza arranjo estrutural sem reforçadores, somente o material sanduiche da caixa do vagão compõe a estrutura. Portanto apenas a geometria em elemento de casca compõe este modelo.

No segundo modelo foram considerados reforçadores ao longo da caixa, representados por elementos de viga com rigidez pré-estabelecida. O perfil de viga destes elementos foi posicionado na parte externa da caixa do vagão, ou seja, os reforçadores representados são externos. Portanto este modelo é composto da geometria do vagão em elemento de casca com reforçadores representados por elementos de viga distribuídos na sua caixa das paredes ao teto.

O terceiro modelo estrutural foi o vagão com cavernas estruturais, estas cavernas foram representadas por elementos de casca assim como a caixa do vagão. Desta maneira, este modelo consiste somente na geometria do vagão com cavernas representadas por elementos de casca. Esta geometria com cavernas foi apresentada na Figura 14.

Em cada modelo foi feito primeiramente uma simulação em material isotrópico e depois em materiais compósitos. Assim, realiza-se uma análise mais simples e depois uma mais complexa. Na primeira análise, em material isotrópico, foi definido utilizar a plotagem das direções das tensões máximas principais como base para estabelecer a disposição do sentido das lâminas de fibra. Ou seja, o plote das direções das tensões principais da primeira análise foi base para definir as direções das lâminas na análise subsequente, a análise em compósitos. Pois, a maior rigidez e resistência do material é em sua direção longitudinal, o que pode levar a concluir que, colocar os fios de tecido paralelo as tensões principais é uma forma de otimizar definindo o sentido mais resistente da fibra com a direção mais requisitada de carga. Portanto, a princípio, a definição dos sentidos das lâminas foi feito baseado na análise em material isotrópico.

Após estabelecer a organização dos modelos finalmente as análises foram simuladas, iteradas e os resultados foram analisados.

### 3.4.2 Metodologia de comparação

As análises foram iteradas até chegar a uma espessura de lâmina com que o modelo em compósito analisado obtenha as tensões na direção longitudinal abaixo de 90 MPa. As tensões foram analisadas nas duas lâminas do material sanduiche do vagão. Nos resultados, o laminado externo da caixa do vagão foi chamado de Lâmina 1 e a laminado interno foi chamado de Lâmina 2.

Em seguida, os resultados foram anotados e foi calculado o peso da caixa do vagão a partir da espessura obtida. Este peso foi calculado com as equações a seguir:

$$P_{laminado} = D_{lâminas} \cdot A_{vagão} \cdot \{ (\rho_f \cdot \psi) + [\rho_m \cdot (1 - \psi)] \} \text{ [kg]} \quad (8)$$

$$P_{núcleo} = D_{núcleo} \cdot A_{vagão} \cdot \rho_{núcleo} \text{ [kg]} \quad (9)$$

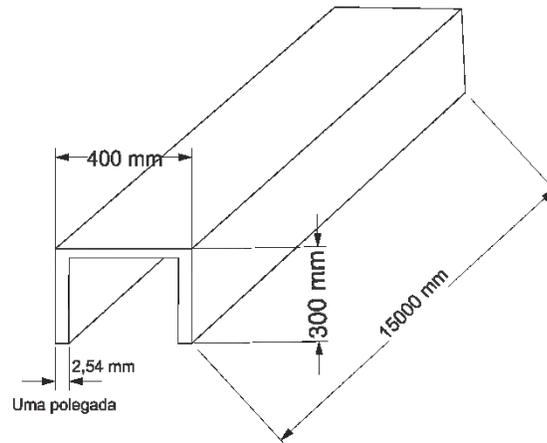
$$P_{caixa} = P_{laminado} + P_{núcleo} \text{ [kg]} \quad (10)$$

onde  $D_{lâminas}$  é o diâmetro das lâminas de fibra e resina;  $A_{vagão}$  é a área total da superfície do vagão;  $\rho_f$ ,  $\rho_m$  e  $\rho_{núcleo}$  são as densidades da fibra, da matriz e do núcleo;  $\psi$  é a fração mássica de fibra no laminado;  $D_{núcleo}$  é o diâmetro de 50 mm do núcleo inercial;  $P_{laminado}$  e  $P_{núcleo}$  são o peso da caixa do vagão em laminado e núcleo que somados resultam no peso total da caixa do vagão ( $P_{caixa}$ ).

Após calcular o peso da caixa do vagão, foi calculado o peso da infraestrutura do vagão ( $P_{infra}$ ). Este peso foi calculado somando os pesos dos ACTs, travessas centrais, travessas laterais, rodeiros, sistemas de freio e longarina central.

O peso da longarina central foi calculado a partir das dimensões do vagão HFT da frota da RUMO (2015). Sabendo que a longarina central é uma viga em U e considerando ser uma chapa de aço de uma polegada, foi calculado a área em chapa da longarina central. Esta área foi multiplicada por 199,187 [kg/m<sup>2</sup>] (EUROAÇOS, 2018), resultando no peso da longarina central. A Figura 15 mostra as dimensões da longarina central utilizadas neste cálculo:

Figura 15 – Dimensões da longarina central



Fonte: O Autor (2018)

Com o peso da longarina central calculado, foi retirado o peso dos outros sistemas através do catálogo da empresa WICHITA (2018). A Tabela 6 mostra os pesos de cada sistema que compõe o peso da infraestrutura do vagão ( $P_{infra}$ ).

Tabela 6 – Cálculo do peso da infraestrutura do vagão

Sistema do Vagão	Peso Unitário [kg]	Quantidade	Peso Total [kg]
ACT	132,45	2	265
Travessa Central	385,55	2	771,1
Travessa Lateral	226,8	4	907,18
Rodeiro	1043,26	4	4173,04
Sistema de Freio	300	1	300
Longarina Central	2987,80	1	3286,58
Total	5075,87	14	9404,04

Fonte: WICHITA (2018) e EUROAÇOS (2018)

Portanto, o peso da infraestrutura ( $P_{infra}$ ) obtido foi de 9.404,04 [kg]. Por segurança e facilidade, este peso foi arredondado para 10.000 [kg]. Em cada arranjo estrutural, este peso ( $P_{infra}$ ) foi somado com o peso da caixa de vagão em compósito e o peso final do vagão ( $P_{vagão}$ ) é obtido como resultado.

$$P_{vagão} = P_{infra} + P_{caixa} [kg] \quad (11)$$

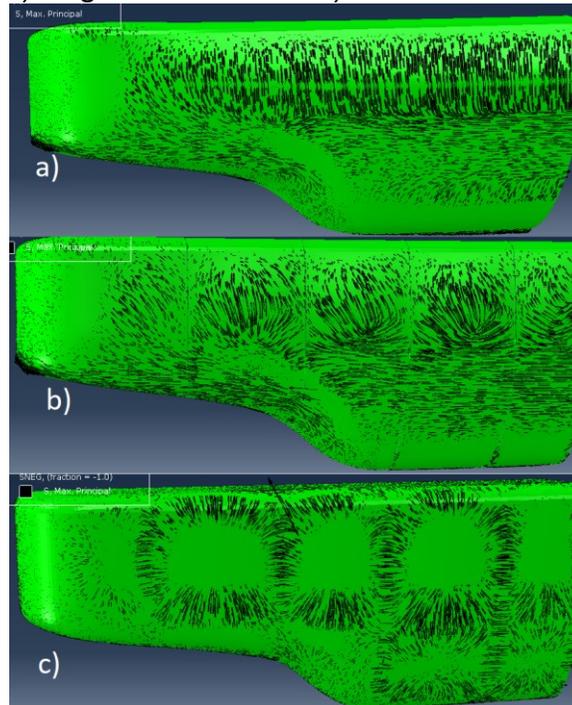
O peso final do vagão de cada arranjo estrutural pode ser uma medida de comparação de leveza. Os resultados das análises serão apontados e discutidos no próximo capítulo.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo serão apresentados os resultados das análises em elementos finitos e suas principais discussões. Os resultados foram divididos em três períodos de análises onde cada período analisou um arranjo estrutural. Antes de mostrar os resultados serão apresentadas características observadas nos três períodos de análises.

Através do plote das direções das tensões máximas principais nas análises em material isotrópico, foi possível observar vetores de várias direções em diferentes regiões. A Figura 16 mostra uma vista lateral do plote das direções das tensões máximas principais dos três arranjos estruturais. A Figura 16 a) do primeiro modelo, a Figura 16 b) do segundo modelo e a Figura 16 c) do terceiro modelo.

Figura 16 – Plote das direções das máximas tensões principais do a) Primeiro modelo; b) Segundo modelo e c) Terceiro modelo.



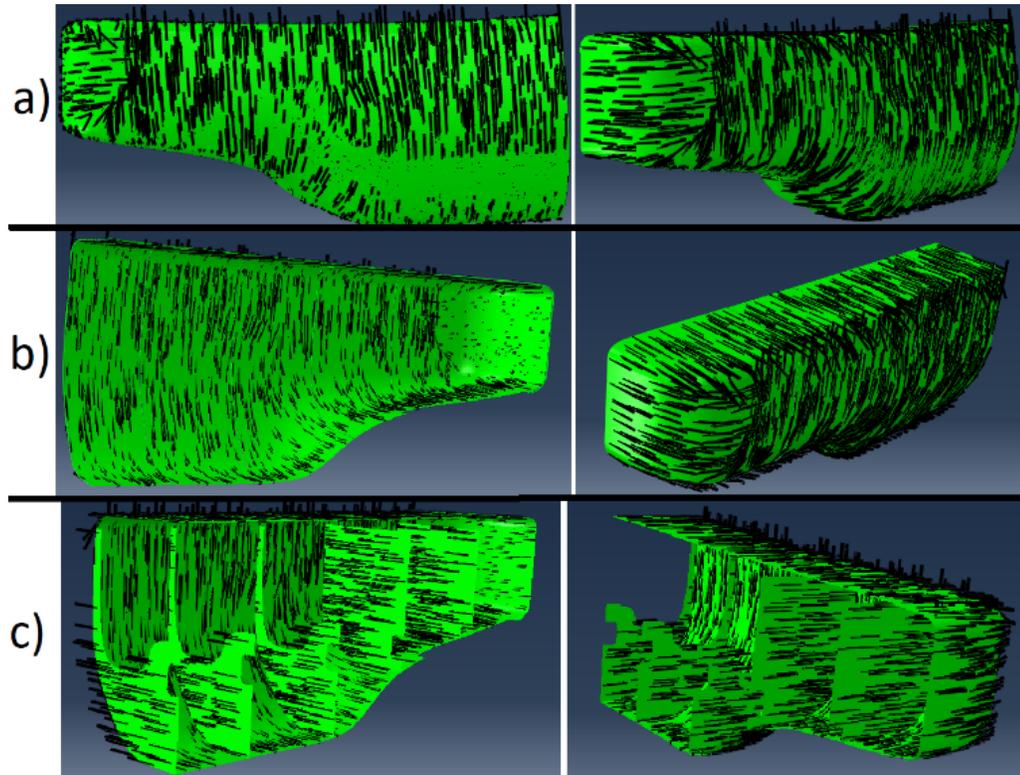
Fonte: O Autor (2018)

Com tudo isso, têm-se dificuldades para definir uma direção preferencial do laminado que esteja conforme a maioria das direções das tensões máximas principais. Para direcionar as fibras da melhor forma, o modelo poderia ser dividido em sub-regiões, onde cada uma fosse direcionada com sua melhor orientação. No entanto, isso não foi feito por simplificação deste trabalho. A fim de reduzir o problema, foi definido no software ABAQUS utilizar apenas a direção  $0^\circ$  em relação ao eixo z, nos três arranjos estruturais. Porém, em uma eventual fabricação do vagão, a alocação de diferentes direções na caixa do vagão poderia ser utilizada como forma de otimização.

Também como forma de otimização deste trabalho, em cada região poderia utilizar determinada espessura de lâmina de acordo com a solicitação mecânica. Ou seja, em regiões menos solicitadas poderia diminuir a quantidade de material reduzindo o peso do vagão. Como foi definido manter a mesma espessura em toda caixa do vagão, esta otimização fica como recomendação na continuação deste trabalho.

O direcionamento não uniforme das lâminas devido a complexidade do modelo foi uma dificuldade das análises no software. Ou seja, houve dificuldade de manter todas as paredes, chão e teto do vagão com a mesma orientação da fibra. Portanto, a parede do fundo ficou com uma disposição horizontal, enquanto as outras regiões ficaram corretas. Este problema poderia ser corrigido dividindo a caixa em regiões e direcionando cada região no sentido correto. Porém, isso não foi feito. A Figura 17 a) mostra o plote das direções do laminado no primeiro modelo, a Figura 17 b) no segundo modelo e a Figura 17 c) no terceiro modelo estrutural.

Figura 17 – Plote das direções do laminado nos modelos estruturais. a) Primeiro modelo; b) Segundo modelo; c) Terceiro modelo.



Fonte: O Autor (2018)

Estas observações são fundamentais para caracterizar as principais questões envolvidas nas análises dos três modelos em compósitos. A seguir, serão apresentados os resultados de cada modelo estrutural.

#### 4.1 PRIMEIRO MODELO ESTRUTURAL

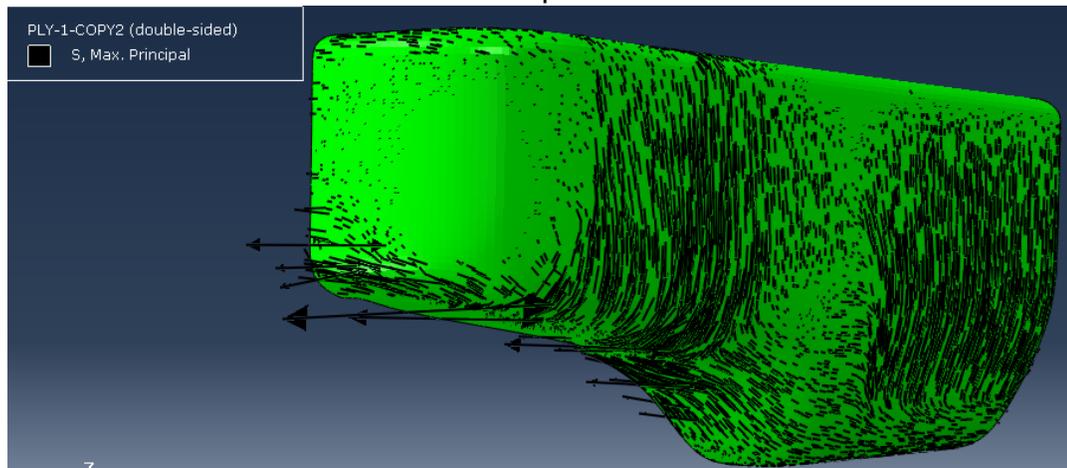
Como já citado no capítulo anterior, o primeiro período de análises foi com a caixa do vagão sem reforçador. No vagão sem reforço, todas as cargas do vagão estão apoiadas no engaste da longarina central. Ou seja, 105 toneladas de cargas estão apoiadas nas duas regiões do furo passante onde a caixa é fixada na longarina. Com isso tem-se altas tensões nesta área de fixação.

Além disso, nesta disposição estrutural não há nenhum tipo de reforço em seu corpo para contribuir na distribuição de tensões. O que favorece ainda mais elevadas

tensões na região do engaste. Estas elevadas tensões aumentam consideravelmente a espessura da lâmina de fibra para alcançar as tensões admissíveis estabelecidas.

Após iterar a análise em compósito, foram apresentadas as direções das máximas tensões principais, conforme a Figura 18.

Figura 18 – Plote das direções das máximas tensões principais do vagão sem reforço em compósitos.



Fonte: O Autor (2018)

É possível verificar com este plot que quase todos os vetores das direções das tensões principais pendenciaram ao sentido da fibra. Sugere-se que a direção das tensões principais na análise em compósitos se orienta no sentido da maior rigidez, ou seja, na direção das fibras.

Com a análise em compósito, a espessura que aproximou as tensões longitudinais do valor de 90 MPa foi de 13 mm nas duas lâminas. A Tabela 7, mostra os resultados desta análise.

Tabela 7 – Principais resultados da análise em compósitos sem reforçador.

Análise	Lâmina 1	Lâmina 2
Máxima Tensão S1	57 MPa	51 MPa
Mínima Tensão S1	-90 MPa	-73 MPa
Máxima Tensão S2	23 MPa	23 MPa
Mínima Tensão S2	6 MPa	16 MPa
Espessura de cada Lâmina	13 mm	13 mm
Deslocamento Máximo	32 mm	
Peso da Caixa	9463 kg	
Peso Total do Vagão	19463 kg	

Fonte: O Autor (2018)

Na tabela 7 é possível observar que na lâmina 2 as tensões ficaram inferiores a 90 MPa. Esta inferioridade pode indicar que a espessura da lâmina 2 poderia ser reduzida. No entanto, ao reduzir a espessura da lâmina 2, as tensões da lâmina 1 eram elevadas acima de 90 MPa. Por isso foi definido deixar estas espessuras que mantiveram estes resultados.

Neste arranjo estrutural, o maior valor de tensão foi a mínima tensão longitudinal na lâmina 1. Isto significa que uma tensão compressiva foi a mais crítica se aproximando dos 90 MPa. No entanto, os 90 MPa foram retirados de um teste experimental trativo, ou seja, para cargas compressivas deveria ser utilizado um teste de falha compressiva. Porém, houve dificuldade de encontrar estes valores experimentais de cargas compressivas e foi mantido este critério para cargas compressivas.

Também neste trabalho poderia ser utilizado critérios de falha mais completos, como, por exemplo, o critério de falha de compósitos bem difundido de Tsai-Wu. Porém, neste critério em especial, houve dificuldades de encontrar dados que alimentam as equações deste critério. Para a equação de Tsai-Wu, dados como tensão de falha de tração e compressão nas direções longitudinais e transversais são fundamentais. Por este fato, se manteve a análise da tensão na direção longitudinal aplicando um elevado fator de segurança encontrado na DNV (2016).

Por estas dificuldades em critérios de falha e obtenção de dados, este trabalho tornou a análise mais comparativa e não quantitativa. Ou seja, as análises possuem um caráter de comparação entre os diferentes resultados dos arranjos estruturais e não uma preocupação fiel da precisão dos valores dos resultados quanto a espessuras e tensões.

Analisando o deslocamento máximo, foi possível identificar que ele ocorre em uma região que se localiza no centro do vagão. Esta localização pode ter fundamento, já que o vagão possui cargas distribuídas e seus engastes estão próximas as suas extremidades o que aparenta a uma viga bi-engastada. Assim como a viga bi-engastada, a caixa do vagão obteve maior deflexão no centro.

Além disso, o deslocamento máximo de 33 mm pode ser considerado pequeno se comparado com os 15 metros da dimensão máxima do vagão. No entanto, houve dificuldade de encontrar critérios de rigidez para vagões, portanto estes resultados foram apenas para discussão e comparação.

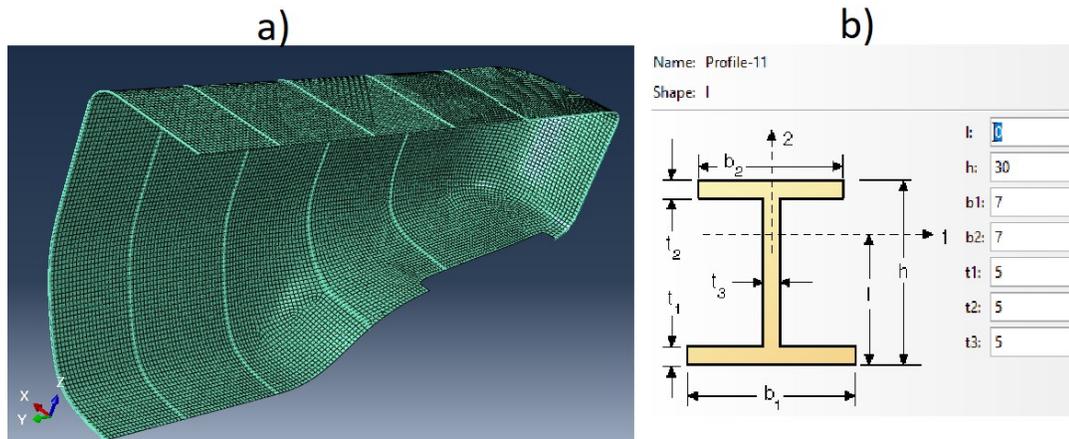
No entanto, em futuras análises, devem ser levadas em conta as cargas dinâmicas de impactos que o vagão sofrerá em seus trajetos. Estas cargas de impacto poderiam elevar o deslocamento máximo. Este tipo de análise foi feito por Sergeichev (2014), onde seu estudo analisou as cargas no vagão durante um impacto utilizando malha euleriana para representar os grãos durante o impacto.

## 4.2 SEGUNDO MODELO ESTRUTURAL

O segundo modelo estrutural foi feito utilizando reforçadores no arranjo, onde estes reforçadores são vigas posicionadas ao longo do corpo do vagão. Os reforços foram representados com elemento de viga onde definimos um momento de Inércia e o módulo de elasticidade do seu material. O momento de inércia é definido através do dimensionamento do perfil da viga que juntamente com o módulo de elasticidade é possível definir a rigidez destes reforçadores.

A Figura 19 a) mostra a distribuição das vigas ao longo do corpo do vagão e a Figura 19 b) mostra o perfil dos elementos de viga.

Figura 19 – a) Vagão com reforçadores e b) Perfil dos elementos de viga.



Fonte: O Autor (2018)

O perfil definido para os elementos de viga obteve 6552 [mm<sup>4</sup>] de momento de inércia transversal. Multiplicando estes momentos de inércia pelo módulo de elasticidade considerado (200 GPa), temos a rigidez transversal da viga de 1310 [N.m]. No peso da caixa e do vagão foi adicionado o peso das vigas, que ficou em torno de 136 [kg].

Com as considerações descritas o modelo foi iterado e analisado. A Tabela 8 mostra os principais resultados deste segundo modelo estrutural:

Tabela 8 – Principais resultados da análise em compósitos com reforçador.

Análise	Lâmina 1	Lâmina 2
Máxima Tensão S1	70 MPa	89 MPa
Mínima Tensão S1	-84 MPa	-44 MPa
Máxima Tensão S2	61 MPa	76 MPa
Mínima Tensão S2	-22 MPa	-56 MPa
Espessura de cada Lâmina	4,5 mm	4,5 mm
Deslocamento Máximo	66 mm	
Peso da Caixa	4428 kg	
Peso Total do Vagão	14428 kg	

Fonte: O Autor (2018)

Na Tabela 8 é possível observar uma redução do peso em comparação com o primeiro modelo estrutural. Em contrapartida, este segundo modelo obteve maior deslocamento máximo.

Também foram analisadas as tensões nas vigas neste segundo modelo. Analisando as tensões nas vigas, obteve-se em torno de 300 MPa de tensão no critério de Von Mises. O critério de Von Mises foi utilizado na viga pois ela foi considerada em aço.

Os elementos de viga são caracterizados pela rigidez que é dado pelo módulo de elasticidade do material multiplicado pelo momento de inércia da seção do reforçador. Por isso, outros materiais, com menor rigidez que o aço, podem ser utilizados na confecção dos reforçadores, sendo compensados aumentando a seção transversal da viga. Portanto, a tensão nos elementos de viga pode ser alterada de acordo com o projeto do reforçador. As questões de fabricação dos reforçadores serão abordadas no próximo capítulo.

#### 4.3 TERCEIRO MODELO ESTRUTURAL

O terceiro modelo estrutural foi feito com a geometria do vagão reforçada com cavernas (Figura 14). Conectando uma parede lateral em outra, as cavernas fornecem rigidez nas paredes da caixa. Além de fornecer certa rigidez, as cavernas possuem uma fixação na longarina central.

Como as cavernas possuem o mesmo material sanduiche da caixa, elas foram representadas com elemento de casca. Também foi definido que as cavernas se constituem das mesmas espessuras e direções do material sanduiche da caixa do vagão.

Após várias simulações, foi possível chegar na espessura de 2 mm para a lâmina 1 e 2,2 mm para a lâmina 2. A Tabela 9 mostra os resultados da análise em compósitos.

Tabela 9 – Principais resultados da análise em compósitos com cavernas.

Análise	Lâmina 1	Lâmina 2
Máxima Tensão S1	86 MPa	89 MPa
Mínima Tensão S1	-28 MPa	-76 MPa
Máxima Tensão S2	31 MPa	25 MPa
Mínima Tensão S2	-56 MPa	-53 MPa
Espessura de cada Lâmina	2 mm	2,2 mm
Deslocamento Máximo	14 mm	
Peso da Caixa	3616 kg	
Peso Total do Vagão	13616 kg	

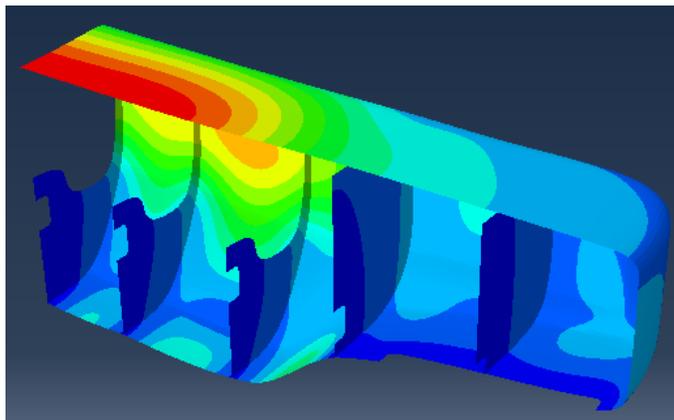
Fonte: O Autor (2018)

Neste modelo estrutural, podemos ressaltar o deslocamento máximo de 14 mm. Este deslocamento foi relativamente inferior aos outros arranjos que alcançaram 66 mm e 32 mm (Tabela 8 e Tabela 9). Isso evidencia este arranjo como o melhor em rigidez global da estrutura.

#### 4.4 COMPARAÇÃO DOS TRÊS MODELOS ESTRUTURAIS

Os deslocamentos máximos dos três arranjos estruturais foram na mesma região central do teto do vagão. A Figura 20 mostra esta localização.

Figura 20 – Plote de deslocamento do terceiro modelo estrutural

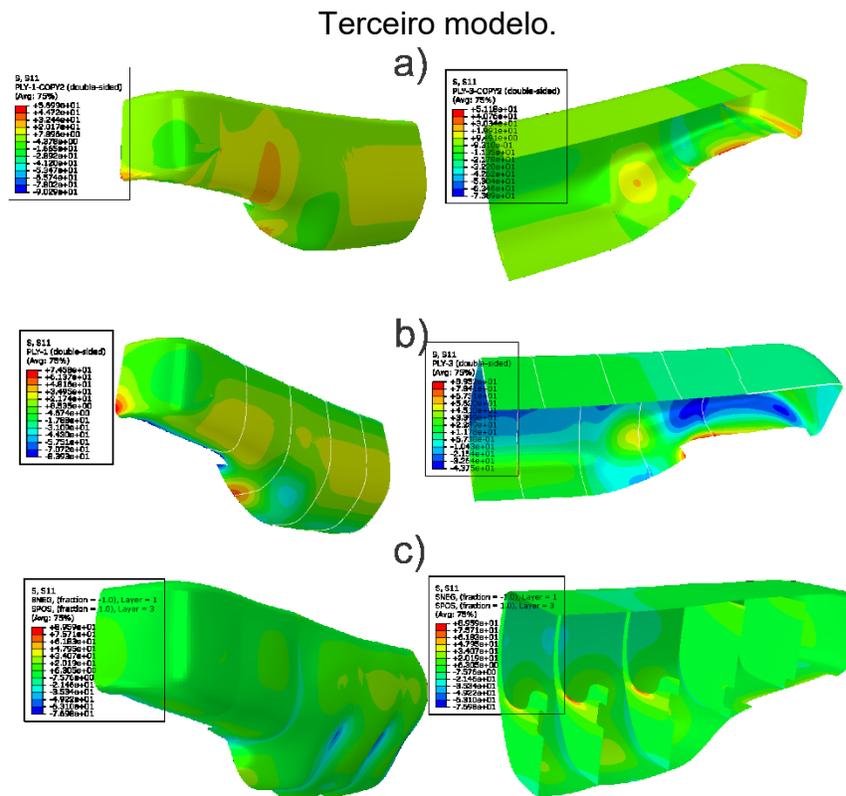


Fonte: O Autor (2018)

Com isso, pode ser sugerido nos próximos trabalhos, a utilização de reforços no teto. Estes reforços no teto podem aumentar a rigidez global da caixa e diminuir ainda mais o deslocamento máximo da estrutura. Também, o formato da caverna estrutural, do terceiro arranjo, pode ser melhorada, estendendo a geometria da caverna até o teto e otimizando sua geometria.

Analisando o plote das tensões longitudinais dos três arranjos, é possível observar que o terceiro arranjo, ao contrário dos outros, não obteve as maiores tensões na região do engaste. A Figura 21 mostra a comparação do plote dos três arranjos.

Figura 21 – Plote das tensões longitudinais a) Primeiro modelo; b) Segundo modelo e c)



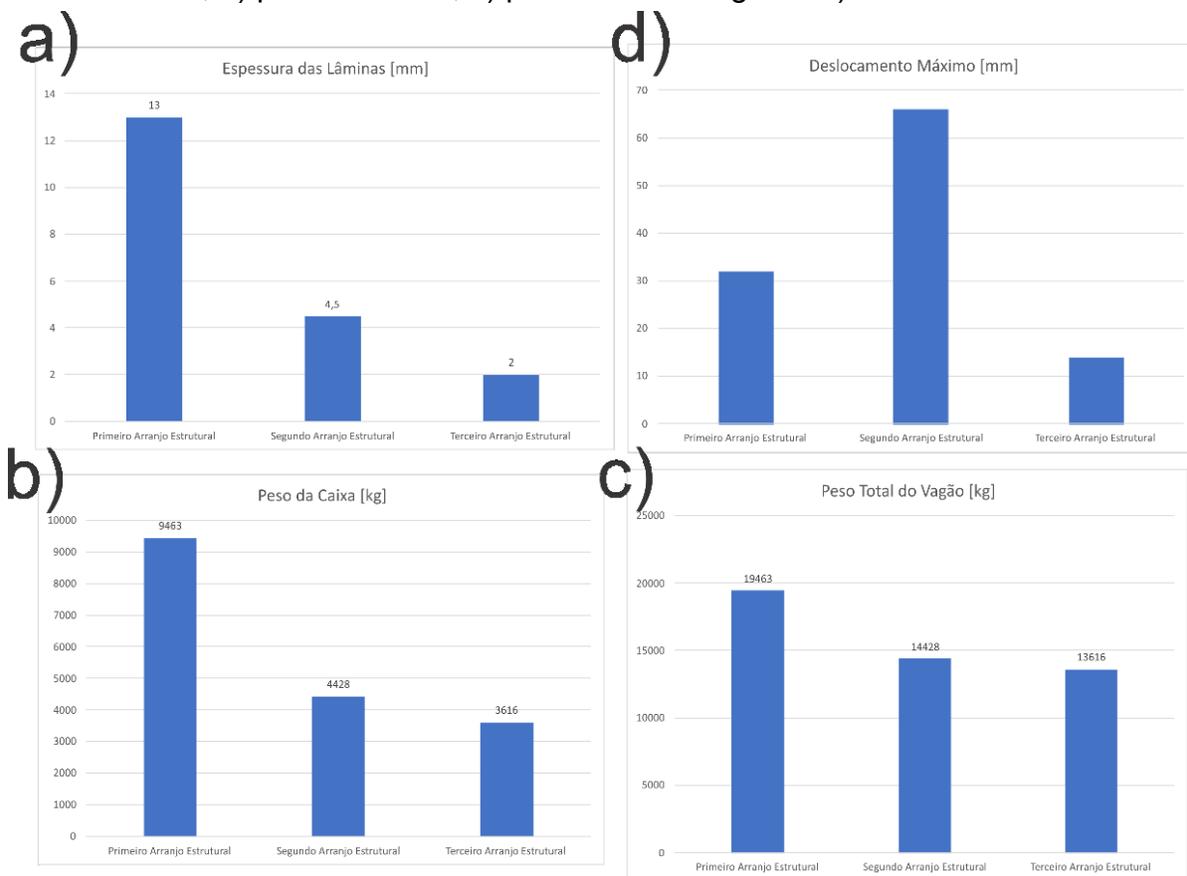
Fonte: O Autor (2018).

Com estes plotes da Figura 21 é possível comparar a distribuição de tensões no corpo dos três arranjos estruturais. Pela grande concentração de tensão em que os engastes promovem, na metodologia foi definido deletar 4 elementos após a linha do engaste. No entanto, no terceiro arranjo estrutural, as maiores concentrações de tensões não foram nas regiões de engaste. Então, não houve necessidade de deletar os

elementos da região de engaste para as análises de resultados do terceiro arranjo estrutural. Esta observação pode significar que o vagão com cavernas conseguiu distribuir bem as tensões utilizando várias regiões de fixação.

Para ilustrar os resultados dos três modelos estruturais, foi plotado um gráfico comparativo da espessura das lâminas, peso da caixa, peso total do vagão e deslocamento máximo. A Figura 22 mostra estes gráficos.

Figura 22 – Gráficos comparativos dos três modelos estruturais: a) Espessura das Lâminas, b) peso da caixa, c) peso total do vagão e d) deslocamento máximo.



Fonte: O Autor (2018).

O terceiro arranjo estrutural alcançou 6 vezes menos espessura de lâmina e quase 5 toneladas a menos de peso do que o primeiro modelo estrutural. Além de que, o terceiro modelo obteve o deslocamento máximo quase 5 vezes menor do que o segundo arranjo estrutural. Com estes resultados é possível observar a superioridade do terceiro arranjo estrutural.

## 5 FABRICAÇÃO E OUTRAS DISCUSSÕES

A discussão sobre a fabricação deste vagão, levando em conta as diferenças dos arranjos estruturais é de grande relevância para a continuação deste projeto. Cada arranjo estrutural apresenta uma característica de fabricação que poderia facilitar ou dificultar a viabilidade de ter um vagão em compósito em uma linha de produção em escala.

No entanto, antes de discutir a fabricação da caixa temos que levar em consideração a longarina central e as escotilhas e tremonhas. A longarina central é importante estrutura dos vagões de carga. Neste trabalho, por simplicidade, foi definido não modificar o material usado na fabricação da longarina. E então, foram direcionados esforços no modelamento e análise somente para a caixa do vagão, considerando a caixa fixa estruturalmente na Longarina o que deixou menor, a princípio, a análise deste trabalho.

Da mesma forma, as escotilhas e tremonhas também não foram consideradas no modelamento, pois este trabalho focou na estrutura geral da caixa do vagão. Será apresentado neste capítulo, uma discussão sobre a fabricação da caixa do vagão, a problemática da fabricação da longarina central, das escotilhas, tremonhas e dos arranjos estruturais.

### 5.1 FABRICAÇÃO DA CAIXA DO VAGÃO

Fabricar peças em materiais compósitos consiste em impregnar a matriz nas fibras e polimerizá-las dentro de um molde que dê a forma geométrica. Este processo é chamado de laminação e existem vários métodos de concebê-lo. O método de laminação que podemos sugerir para concepção da caixa é por infusão. O processo de infusão consiste em utilizar o vácuo para molhar a resina nos reforços, dentro de um molde fechado por uma bolsa que veda a entrada de ar.

O molde para laminação pode ser feito de fibra. A concepção da forma geométrica do vagão pode ser através de usinagem de poliuretano e a partir do modelo usinado é fabricado o molde. Vale lembrar que a peça precisa ser desmoldada, então o molde precisa respeitar um determinado ângulo de extração que possibilite um fácil desmolde.

Geometrias fechadas, como a caixa do vagão, podem ser feitas em duas partes, dividindo o teto do corpo da caixa, em dois moldes diferentes. Depois de fabricar o teto e o corpo da caixa, pode ser utilizado uma laminação de união.

O corpo da caixa, por ser uma grande geometria, pode ser feito em um molde bipartido. O molde bipartido é a divisão do molde, onde nas extremidades da partição há abas que são parafusadas. Na desmoldagem, estas abas podem ser desparafusadas e puxadas mecanicamente, facilitando o desmolde. Outra solução para facilitar a desmoldagem é laminar engastes em pontos determinados junto à caixa do vagão, de forma que a caixa possa ser cuidadosamente puxada por talhas na desmoldagem. E no acabamento da caixa, estes engastes podem ser retirados ou mantidos para utilizar na movimentação do vagão por pontes rolantes, durante os processos de fabricação.

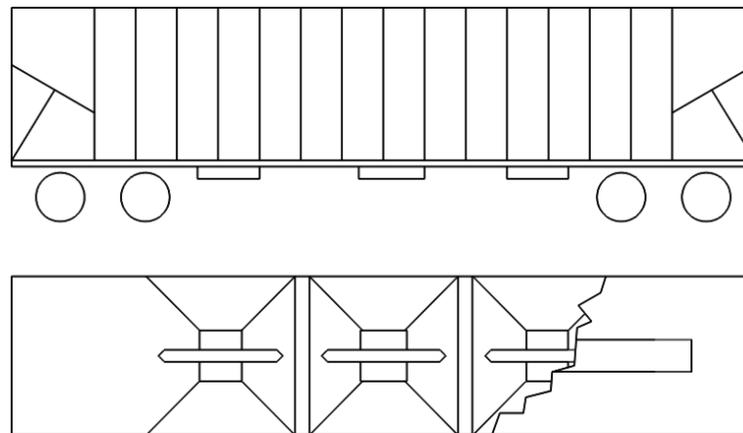
Vale lembrar a importância de abas aos arredores do molde. Esta aba é utilizada como a região onde é vedado a bolsa de vácuo. Também pode ser utilizada pelos operadores para apoiar as mangueiras de entrada de resina, de vácuo e dos tubos espirais necessários no processo de infusão. O que torna a aba essencial para boa execução do processo.

Em conjunto com estas sugestões para o molde, como forma de aprimorar o processo de infusão, pode ser utilizado ferramentas de simulação do escoamento da resina no molde. Esta análise de escoamento da resina tem a função de testar pontos da entrada da resina e pontos de vácuo, variando quantidade destes pontos e suas localizações. O objetivo principal é otimizar o tempo do processo, evitar desperdício de resina e não deixar regiões delaminadas, ou seja, áreas não molhadas pela resina, ao final do processo. Sergeichev (2014) utilizou esta ferramenta e achou uma região crítica de delaminação na fabricação do seu vagão (Figura 24).

## 5.2 O PROBLEMA DA LONGARINA CENTRAL NO VAGÃO EM COMPÓSITO

A Longarina Central é a principal estrutura dos vagões de carga. Esta estrutura, se localiza na parte inferior do vagão se estendendo longitudinalmente até fora da caixa, onde, em cada extremidade é acoplado o ACT (Aparelho de Choque e Tração). Através deste aparelho, as cargas longitudinais vindas da locomotiva e dos outros vagões são recebidas e amenizadas por este equipamento. Além destas cargas dinâmicas, a longarina central, apoiada nos dois pratos piões do truque, recebe o peso da carga e da caixa do vagão. A Figura 23 mostra um esboço da longarina central dentro da caixa de um vagão.

Figura 23 – Vagão Hopper, com vista interna, para visualizar disposição da longarina central.



Fonte: Cavalcanti (1992)

Neste contexto, percebemos o alto valor estrutural da Longarina Central na composição do vagão. Por esta razão, modificar ou manter o material da longarina em um vagão em compósitos gera efeitos que devem ser considerados.

Manter a longarina central em aço apresenta problemas na união de dois materiais diferentes, como por exemplo a carência de adesão entre aço e matriz polimérica, tornando esta união uma região crítica e propícia ao descolamento. A junção entre aço e compósitos requer ainda mais cuidados devido às cargas dinâmicas, oscilatórias e de impacto sofridas pela Longarina que poderão ser transmitidas para a caixa do vagão através desta eventual união. Além do mais, uma longarina em aço seria

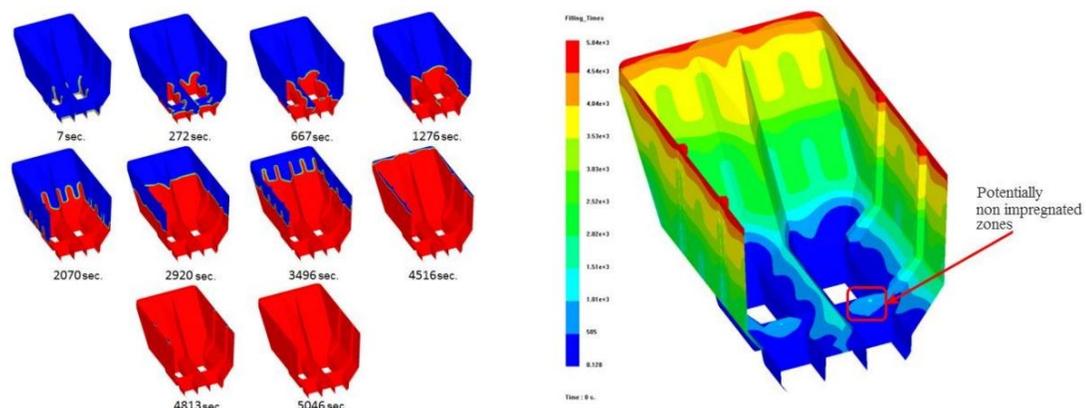
mais agravante no primeiro arranjo estrutural, pois neste arranjo, como visto no capítulo anterior, possui alta criticidade ao redor da fixação da longarina deixando uma união aço compósito extremamente limitada nesta região.

Ao contrário disso, fazer a longarina em compósito poderia facilitar a união com a caixa do vagão pois estas possuem as mesmas propriedades químicas de que tornam esta união com maior adesão. Com a longarina em compósitos a junção poderia ser reforçada com várias camadas de fibras em uma laminação de união. Além destes reforços em tecido de fibra, poderia ser adicionada fixadores mecânicos ou desenvolver uma geometria de travamento.

Na fabricação de uma longarina central em compósitos poderia ser utilizado o processo de pultrusão, onde um perfil de fibra é extrudado utilizando vários filamentos de fibra. Também podemos recordar a possibilidade de fabricar a longarina com uma geometria complexa reduzindo o perfil nas regiões menos solicitadas ao longo de seu comprimento. Um trabalho futuro poderá ser feito para analisar a viabilidade de uma longarina feita em compósitos utilizando algumas possibilidades aqui citadas.

Como referência desta discussão podemos analisar o trabalho de Sergeichev (2014). A união da longarina central com a caixa em compósito não foi abordada. Porém, na Figura 24, retirada de seu trabalho, é apresentado a simulação do processo de infusão contendo a geometria da longarina em fibra.

Figura 24 – Impregnação da resina no processo de infusão do vagão de Sergeichev.



Fonte: Sergeichev (2014)

Com estas imagens podemos entender que a longarina em aço pode ter sido unida dentro de um perfil de fibra que compõe a própria geometria da caixa de compósitos. Ou seja, foi feito na caixa do vagão um perfil em laminado de fibra onde é encaixado a longarina central. Esta opção pode ser interessante para manter a longarina fabricada em aço, pois através deste layout a caixa é apoiada na longarina em toda região interna do vagão deixando esta união menos crítica.

Também podemos destacar o arranjo estrutural com cavernas, abordado neste trabalho, por possuir menor criticidade da união com a longarina. Esta solução, como mostrada no capítulo anterior, obteve os melhores resultados de espessura do laminado e deslocamento máximo. Cada caverna estrutural possui um furo que se apoia na longarina central, distribuindo melhor as tensões. Também, neste arranjo estrutural, não demonstrou altas concentrações de tensões nas regiões de fixação como nos outros arranjos. A fabricação destas cavernas e dos outros arranjos serão retratados a seguir.

### 5.3 AS TREMONHAS E ESCOTILHAS

As tremonhas e escotilhas, citadas no capítulo 2, são fundamentais para o funcionamento do vagão. Elas são utilizadas no vagão Hopper, que foi o vagão baseado deste trabalho. Através das escotilhas localizadas no teto, os grãos são carregados. E a carga é descarregada pelo chão através das tremonhas por ação da gravidade.

Nas análises em elementos finitos, não foram considerados estes mecanismos de portas por simplificação do trabalho. No entanto, estes dispositivos poderão ser abordados em futuros trabalhos. As escotilhas não possuem requisitos estruturais tão grandes quanto as tremonhas. Pois as tremonhas se posicionam no chão, onde há maior carregamento de pressão pelos grãos. Por isso, vale propor futuros estudos para dimensionamento adequado destes mecanismos. Lembrando das dificuldades de união entre metal compósito.

Podemos acrescentar que com o mecanismo de tremonha, altamente requisitado mecanicamente, estruturas de reforços podem ser adicionadas no chão da caixa a fim de dar suporte a estes mecanismos. Com tudo isso, podemos sugerir futuros trabalhos que analisem as cargas na chapa da tremonha, propondo utilização dos compósitos como

material e investiguem os modos de fechadura e dobradiça que podem ser utilizados na tremonha.

#### 5.4 FABRICAÇÃO DOS ARRANJOS ESTRUTURAIS E SUAS DISCUSSÕES

O primeiro arranjo estrutural é constituído apenas por material sanduiche formando uma superfície uniforme sem reforçadores. O que leva a concluir que na fabricação do primeiro arranjo o uso do processo de infusão em moldes é apropriado para obter toda caixa do vagão.

No entanto, em uma eventual fabricação do segundo e terceiro arranjo estrutural, outros métodos de fabricação devem ser discutidos para obter os reforçadores e as cavernas destes arranjos. Para isso podemos avaliar os métodos de construção naval que já possuem know-how para fabricar arranjos estruturais em compósitos mais complexos.

Nos barcos os reforçadores são internos e alguns possuem perfis utilizando madeira como núcleo, outros utilizam Poliuretano, PVC expandido e até PET reciclável expandido. A Figura 25, mostra a parte interna de um barco construído em fibra com seus reforçadores. Nela é possível ver cavernas e longarinas estruturais semelhantes a que poderiam ser utilizadas neste trabalho.

Figura 25 – Vista interna de um barco em fibra de vidro com reforçadores.



Fonte: O Autor (2018)

Estes tipos de reforços presentes nos barcos e mostrados na Figura 25, são geralmente fabricados em cima do casco por laminação manual. Portanto, após a fabricação do casco por infusão, há um processo de construção estrutural. Deste modo, poderia ser fabricado tanto o segundo quanto o terceiro arranjo estrutural. Mas não necessariamente os reforços e cavernas precisam ser fabricados por laminação manual. Outros métodos mais produtivos poderiam ser utilizados.

O segundo arranjo estrutural foi modelado com elementos de vigas com perfis externos que representam reforçadores ao longo do corpo do vagão. Nas análises foi considerado uma viga em aço. No entanto, num vagão em compósito com esta complexidade geométrica haveria grande dificuldade na fabricação de perfis em aço que se moldam na geometria complexa. Porém, como já abordado, esses reforçadores representados com elementos de viga poderiam ser feitos de outros materiais. Como nos barcos, poderiam ser feitos de materiais compósitos. Evidenciando o fato que os elementos de viga representaram apenas uma rigidez de reforço e não necessariamente uma representação fiel de como seria fabricado.

Tal como observado no caso dos barcos, os elementos de viga poderiam representar a rigidez de reforçadores fabricados em fibra de vidro, ou em fibra com algum material de núcleo. No caso da Figura 25, os reforçadores foram fabricados com espumas de Poliuretano coladas no casco laminadas manualmente com fibra de vidro.

Também não podemos esquecer da disposição dos reforçadores. Os barcos necessitam ter menor resistência hidrodinâmica, portanto seus reforçadores devem ser internos. Como o vagão de cargas não tem alto requisito aerodinâmico, os reforços podem ser externos. Reforços em vagões sendo externos podem contribuir em não ocupar o espaço interno que deveria ser para a carga de grãos.

No entanto, levando esta discussão no âmbito de fabricação podemos considerar que reforçadores internos podem ser mais fáceis de fabricar do que reforçadores externos. Em um processo de infusão para fabricar o vagão, os núcleos inerciais dos reforçadores podem ser colados sobre o núcleo da caixa do vagão, em seguida pode ser posicionado os tecidos, desta forma os reforçadores são fabricados junto com a caixa do vagão em um único processo de infusão. Unificando a fabricação da caixa com a confecção dos reforçadores no mesmo processo o tempo de produção é reduzido.

Esta discussão sobre fabricação dos reforçadores também pode ser repassada para as cavernas. As cavernas são estruturas sempre internas. Se as cavernas são internas e os esforços do vagão tendem a empurrar as paredes para fora, as cavernas sofrerão tração, explorando as propriedades de resistência a tração das fibras. No entanto, ao mesmo tempo que as fibras resistem bem a tração, a união entre a caverna e a parede do vagão pode ser comprometida. Esta junção caverna-parede deve ser reforçada pois os esforços trativos tenderão a descolar a caverna. Há várias soluções para esta união como por exemplo fazê-la com maior área de colagem, utilizar adesivos, utilizar fixadores mecânicos e reforçar esta união com mais camadas de tecido.

Para complementar, no próximo capítulo será apresentado uma discussão sobre a degradação dos compósitos, alguns modos de falha, soluções e sugestões futuras no âmbito destas degradações e vida em fadiga.

## 6 DEGRADAÇÃO E MANUTENÇÃO DOS COMPÓSITOS

Como qualquer material, os compósitos degradam ao longo do tempo. No entanto, suas características de degradação são diferentes dos aços. Os compósitos têm perdas de propriedades na resina pela ação da radiação UV, umidade, maresia, chuva ácida e ação de poluentes (WICHITA, 2019).

A sensibilidade à umidade é um fator ambiental que pode degradar o material do vagão em compósitos. Os vagões não possuem tanto contato com água quanto os barcos, mas este contato pode se dar nas chuvas, enchentes ou devido à alta umidade da carga transportada. No entanto, nos barcos, esta degradação à água é resistida através de cuidados com os materiais utilizados. Por exemplo, a espuma do núcleo inercial deve ser resistente à água. Podemos citar a espuma de PVC expandido que possui esta propriedade.

Para retardar a degradação dos compósitos devido a ação UV, o vagão pode ser pintado com revestimentos de gel coating e a matriz pode ser adicionado aditivos que atrasam esta fragilização. A benzofenona é um exemplo de aditivo muito utilizado no gel coating para retardar a degradação por raios UV. Também podemos citar os nano compósitos, que são nano partículas inorgânicas adicionadas as matrizes poliméricas que variam favoravelmente as propriedades químicas, térmicas, hidrolíticas e de oxidação. Ou seja, estes aditivos, além melhorar propriedades de resistência a degradação UV é possível criar resinas mais resistentes a umidade. Dentre estes aditivos nano compósitos é possível citar CNTs, ZnO, CdSe, TiO<sub>2</sub>, ZrO<sub>2</sub>, CdTe e Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (WICHITA, 2019).

Outra forma de falha encontrada nos materiais é a fadiga. O estudo do ciclo de vida em fadiga dos compósitos é vasto e ainda muito discutido. No setor aeronáutico o uso dos compósitos obteve redução na manutenção de fadiga em relação a antigas fuselagens em alumínio (HALE, 2006). No entanto, os materiais compósitos utilizados no setor aeronáutico são de alto desempenho e possuem maior custo que poderia

inviabilizar se utilizados em projetos de vagão de carga. No setor eólico, devido as maiores demandas de tamanho das pás e instalações de usinas offshore, os requisitos de projetos tornaram maiores no sentido do ciclo de vida em fadiga. Com o aumento das cargas nas pás, vários estudos têm se desenvolvido a respeito de falhas de macro e micromecânica neste setor (KENSCHÉ, 2006).

O setor eólico pode ser referência no âmbito do ciclo de vida em fadiga para o projeto de manutenção do vagão em compósitos. As cargas dinâmicas sofridas pelas pás podem se assemelhar as cargas cíclicas sofridas pela estrutura do vagão através do aparelho de choque e tração. Os materiais utilizados nas pás eólicas também se assemelham aos escolhidos neste trabalho. O que pode ser sugerido é fazer estudos das cargas dinâmicas em vagões com estrutura em compósito. E a partir de dados experimentais, utilizar os plotes de curvas S-N dos materiais compósitos utilizados no vagão para criar critérios de falha em fadiga e planejar as manutenções a longo prazo.

Com todos estes fatos a respeito das falhas em compósitos, não é possível prever ainda a periodicidade da manutenção do vagão graneleiro em compósitos. Mas podemos sugerir a utilização dos aditivos que retardam a degradação das resinas por UV, corrosão e umidade. Também podemos sugerir a pintura do vagão com gel coat que contenham estes aditivos. Do mesmo modo das pás eólicas, os vagões podem ter a cor branca refletindo os raios solares e contribuindo com a durabilidade.

Para finalizar a discussão deste trabalho, no próximo capítulo será apresentado uma breve discussão e análise de custo do vagão graneleiro em compósito.

## 7 ANÁLISE DE CUSTO DO VAGÃO

Talvez uma das maiores questões de um vagão graneleiro em compósitos é o custo de fabricação. Este valor pode ser elevado devido ao alto custo destes materiais comparado com o preço do aço. Nesta questão, podemos lembrar que os grandes fabricantes de vagões de carga já possuem uma estrutura de fabricação e know-how de projeto de vagões em aço. O que pode dificultar estas empresas de pleitear este tipo de projeto que possuem conhecimentos distintos dos já consolidados por estas companhias.

Por isso, foi decidido fazer uma análise de custo simplificada em termos de matéria prima, que pode gerar a dimensão e caracterizar as principais características do custo produtivo de um vagão em compósitos. Também foi feito um cálculo de redução do consumo de óleo diesel por meio da redução de peso do vagão em compósitos.

### 7.1 CUSTO DOS MATERIAIS DA CAIXA DO VAGÃO

Na segunda semana de junho de 2018, foi pesquisado o preço da fibra de vidro unidirecional, dos núcleos e das resinas na empresa ABCOL. Também foi orçado o custo dos materiais consumíveis na revendedora varejista on-line E-composites. Por ter obtido os melhores resultados, foi utilizado os valores do vagão do terceiro arranjo para estimar o custo de material. Através da quantidade de material necessária para produção do vagão, foi calculado o custo líquido de produção do vagão variando o tipo de núcleo e o tipo de resina.

É importante ressaltar que estes custos não consideram o custo da longarina central, dos mecanismos de tremonhas e escotilhas, dos truques, rodeiros, sistemas de freio e do ACT. Somente são os custos de materiais da caixa do vagão.

A Tabela 10 mostra o custo dos materiais consumíveis, a Tabela 11 apresenta os cálculos do custo do núcleo, da fibra, da resina e a Tabela 12 mostra o custo total líquido de materiais variando o tipo de núcleo e tipo de resina.

Tabela 10 – Cálculo dos custos de materiais consumíveis baseados no preço da revendedora on-line E-composites.

Área do vagão 3° arranjo estrutural	198,5 [m <sup>2</sup> ]
Metros de tacky tape necessários	150 [m]
Preço do tacky tape por 15 m	75 [R\$/15m]
Preço bolsa de vácuo por m <sup>2</sup> (FILME DE VÁCUO WL100BB)	8,75 [R\$/m <sup>2</sup> ]
Preço do Peel Ply por m <sup>2</sup>	7,77 [R\$/m <sup>2</sup> ]
Custo total de tacky tape	R\$ 750
Custo total da bolsa de vácuo	R\$ 1.736,88
Custo total de Peel Ply	R\$ 1.542,35
Custo total dos materiais consumíveis	R\$ 4.029,22

Fonte: Elaborado pelo Autor (2018) com dados da E-COMPOSITES (2018).

Tabela 11 – Cálculo dos custos de materiais compósitos baseados no preço da revendedora ABCOL.

Cálculo de custo do Núcleo	
Equação para cálculo do preço do núcleo	$A_{\text{vagão}} \cdot \text{Preço por área em dolar} \cdot \text{IPI} \cdot \text{Preço do Dolar}$
Área do vagão 3° arranjo estrutural	198,5 m <sup>2</sup>
Preço por área do núcleo PVC densidade 60, de 50 mm de diâmetro por área.	141,85 [US\$/m <sup>2</sup> ]
Preço por área do núcleo PET densidade 80, de 50 mm de diâmetro.	69,95 [US\$/m <sup>2</sup> ]
IPI (Imposto sobre Produtos Industrializados) do núcleo	15%
Preço do dollar considerado	US\$ 3,60
Preço total de núcleo (PVC densidade 60)	R\$ 116.570,91

Fonte: Elaborado pelo Autor (2018) com dados da ABCOL (2018).

Tabela 11 – Cálculo dos custos de materiais compósitos baseados no preço da revendedora ABCOL.

Preço total de núcleo (PET densidade 80)	R\$ 57.484,21
Cálculo de custo da fibra	
Massa de fibra necessária	978,6 [kg]
Preço por kilograma do Tecido de Fibra de Vidro Unidirecional	13,97 [R\$/kg]
IPI da fibra	10%
Preço total tecido	R\$ 15038,15
Cálculo de custo da resina	
Massa de Resina necessária	652,4 [kg]
Resina Polyester	9,03 [R\$/kg]
Resina Epoxy	306,24 [R\$/kg]
IPI da resina	5%
Preço Total Resina Polyester	R\$ 6.185,73
Preço Total Resina Epoxy	R\$ 209.780,50
Cálculo do custo dos materiais compósitos do vagão variando algumas opções	
Custo dos materiais compósitos do vagão com núcleo PVC e resina epóxi	R\$ 341.389,60
Custo dos materiais compósitos do vagão com núcleo PET e resina epóxi	R\$ 282.302,90
Custo dos materiais compósitos do vagão com núcleo PVC e resina Poliéster	R\$ 137.794,80
Custo dos materiais compósitos do vagão com núcleo PET e resina Poliéster	R\$ 78.708,09

Fonte: Elaborado pelo Autor (2018) com dados da ABCOL (2018).

Então, somando o custo dos materiais compósitos com o custo dos materiais consumíveis para produção, temos:

Tabela 12 – Custo total líquido de produção do vagão.

Custo Líquido produção do vagão com núcleo PVC e resina epóxi	R\$345.418,82
Custo Líquido produção do vagão com núcleo PET e resina epóxi	R\$286.332,12
Custo Líquido produção do vagão com núcleo PVC e resina Poliéster	R\$141.824,02
Custo Líquido produção do vagão com núcleo PET e resina Poliéster	R\$82.737,31

Fonte: Elaborado pelo Autor (2018) com dados da ABCOL (2018).

É possível perceber a grande diferença do custo do vagão variando o tipo de núcleo e o tipo de resina nas faixas de R\$82.737,31 a R\$345.418,82. Por isso, estudos a fim de verificar a necessidade de utilizar a espuma PVC ao invés do núcleo de PET ou o uso de matriz epóxi ao invés da resina poliéster podem reduzir consideravelmente o custo líquido de produção.

Complementando as características das cotações, comprando em grandes quantidades estes materiais podem diminuir o preço se importados diretamente com o fabricante, levando em consideração que estes preços são de revendedoras brasileiras que possuem sua margem de lucro.

O vagão deste trabalho possui suas características de carga próximas ao vagão HTT da empresa GBMX (2018). O HTT da GMBX (2018) possui capacidade de carga de 101.700 kg e sua tara é 28.300 kg. Assim como no vagão em compósitos, foi considerado 10 toneladas do peso dos truques, rodeiros, ACTs, sistema de freio e longarina central, resultando em 18.300 kg do peso da caixa do vagão em aço. Com este valor foi feita uma cotação do preço do quilograma do aço e com o preço encontrado foi calculado o custo em chapa de aço do vagão HTT da GBMX (2018).

O aço utilizado para fabricação dos vagões Hopper e Gôndola da empresa RANDOM é o USI-SAC 350 RANDOM (2016). Como houve dificuldades de conseguir a cotação deste aço, foi utilizado uma cotação da GERDAU (2018) com o aço COR 500 que possui aproximadamente mesmas propriedades do USI-SAC 350. Esta cotação foi feita na segunda semana de junho de 2018. Nela foi especificado a quantidade de 10

bobinas de 20 toneladas cada para evidenciar uma compra de grande quantidade. A Tabela 12 mostra esta cotação.

Tabela 13 – Cotação do aço COR 500 da empresa GERDAU.

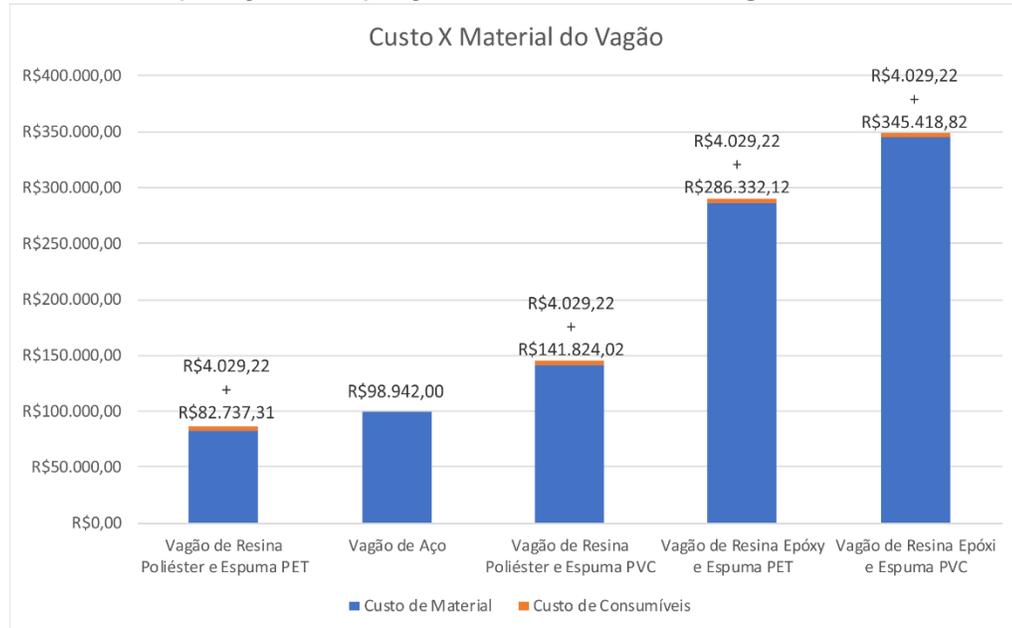
Quantidade	200.000 [kg]
Preço por quilograma sem IPI	5,14 [R\$/kg]
IPI	5%
Preço total	R\$ 1.080.240,00
Preço final por quilograma	5,40 [R\$/kg]
Peso estimado da caixa do vagão HTT	18.300 [kg]
Custo estimado em chapa de aço do vagão HTT	R\$ 98.942,00

Fonte: Elaborado pelo Autor (2018) com dados da GERDAU (2018).

Através da Tabela 12, é possível verificar que o preço em material do vagão HTT está dentro da faixa de custos do vagão em compósitos (R\$ 78.708,09 a R\$ 341.389,60). Da mesma forma que os processos de manufatura em compósitos têm suas despesas com consumíveis e processos de fabricação, o vagão em aço também possuem seus custos de manufatura. No entanto, neste trabalho, estas despesas com consumíveis de manufatura não foram relevadas no vagão em aço.

A fim de comparar os resultados obtidos através das cotações, foi plotado o Gráfico 2.

Gráfico 2 – Comparação dos preços de materiais dos vagões variando o material.



**Materiais Consumíveis: tacky tape, bolsa de vácuo, Peel Ply**  
**Vagão de aço: HTT da GBMX (101 toneladas de capacidade)**

Fonte: Elaborado pelo Autor (2018) com dados ABCOL (2018), E-COMPOSITES (2018), GBMX (2018) e GERDAU (2018).

Com base no Gráfico 2, é possível observar o menor preço de material do vagão se fabricado em resina poliéster e espuma PET. Com isso, é sugerido em futuros trabalhos analisar a viabilidade do uso destes tipos de resina e espuma. Podendo assim, reduzir consideravelmente o custo de um vagão graneleiro em compósitos.

No entanto, não há como afirmar que o custo total para produzir um vagão em aço será maior ou menor do que o custo de produção do vagão em compósitos. Por isso, com a finalidade de mostrar a economia de um vagão mais leve, no próximo subcapítulo foi feita uma discussão e cálculos sobre a redução de consumo em diesel devido à redução de peso do vagão em compósitos.

## 7.2 REDUÇÃO DO CONSUMO DE DIESEL

Além da redução do custo de manutenção, a eficiência energética pode ser um dos indicadores utilizados para demonstrar a viabilidade econômica de um vagão em

compósitos. Através do cálculo do consumo de diesel das locomotivas, podemos verificar a economia de combustível que um vagão de menor tara fornece.

A Figura 26 apresenta o cálculo de eficiência de um trem de minério de ferro com 330 vagões e 4 locomotivas em um trecho de ida e volta.

Figura 26 – Consumo de um comboio de 330 vagões

Consumo médio HELP		3000			
TREM / DATA					
M17 30/07 M08 01/08					
LOCOMOTIVA No	9006	840	857	751	FICHA OK
LITROS SAIDA	17000	18000	18000	16400	
LITROS CHEGADA	2700	2800	3200	6800	
CONSUMO = SAIDA - CHEGADA	14300	15200	14800	9600	
ABASTECIMENTO NO PERCURSO	400	1500	0	0	
<b>TOTAL = CONSUMO + ABASTECIMENTO</b>	14700	16700	14800	9600	

PESO UTIL CARREGADO (PUC)	34460
PESO BRUTO DESCARREGADO (PBD)	6930
DISTANCIA FERROVIA (KM)	892
TKB IDA = PBD x DISTÂNCIA FERROVIA / 1000	6.182
VOLTA = TKB IDA + PUC x DISTANCIA FERROVIA / 1000	36.920
TKB TOTAL	43.101
EE = TOTAL LITROS/TKB TOTAL	1,36

Fonte: VALE (2008)

Para fazer o cálculo de combustível economizado, foi considerado como premissa que a eficiência  $EE$  das locomotivas mantêm 1,36 como no caso da VALE (2008), ilustrado na Figura 26. Também, foi considerado o mesmo trajeto e mesma quantidade de vagões. Através da Figura 26 podemos deduzir que:

$$TKB_{redução} = P_{reduzido} \cdot D \cdot 10^{-3} [Tkm \cdot 10^{-3}] \quad (12)$$

$$EE = \frac{\text{consumo}}{TKB_{redução}} \quad (13)$$

onde  $TKB_{redução}$  é a tonelada bruta quilômetro do peso reduzido [ $T.km/10^3$ ],  $P_{reduzido}$  é o peso reduzido do vagão em compósitos do terceiro arranjo estrutural comparado com o HTT da GBMX (2018),  $D$  é a distância de ida e volta do trajeto em quilômetros e  $consumo$  é o consumo de diesel em litros das locomotivas.

A caixa do vagão em compósitos do terceiro arranjo estrutural obteve 3616 kg e do vagão HTT foi estimado 18.300 kg, alcançando 14.684 kg de redução ( $P_{reduzido}$ ). Aplicando na equação (12), esta redução de peso nos 330 vagões no mesmo trajeto de ida e volta, temos:  $TKB_{redução} = 26196,25 [T.km / 10^3]$ .

Isolando o consumo da equação (13) da eficiência  $EE$ , temos:

$$consumo = EE .TKB_{redução} \quad (14)$$

Portanto, utilizando este caso da VALE (2008), com todas as considerações, temos que o consumo do peso reduzido seria 35.627 [L] de óleo diesel em 330 vagões. Então, dividindo esta economia pelos 330 vagões obtém-se aproximadamente 108 [L] de economia de óleo diesel por vagão, apenas neste trajeto de ida e volta.

Se for considerado que um vagão faz este trajeto uma vez por semana durante 15 anos de sua vida, ele fará este trajeto 9.360 vezes. Portanto, nestas considerações, um vagão em compósitos com esta redução de peso economizaria 1.010.880 [L] de diesel nos 15 anos de uso.

## 8 CONCLUSÃO

Antes de iniciar as conclusões, devemos ressaltar as motivações para desenvolver este trabalho apresentadas na Introdução. Podemos citar a busca pelas melhorias no setor ferroviário de transporte de cargas, que enfrenta atrasos tecnológicos significativos. Acresce-se a estas questões, a procura pela eficiência energética que é um dos principais objetivos das indústrias em geral. Outro ponto a destacar é a inovação no setor de transporte de cargas que em contrapartida com outros setores pouco se vê a utilização de novos materiais.

Com estas motivações, propôs-se uma nova geometria para o vagão graneleiro em compósitos. Foi levado em consideração que os materiais compósitos possuem facilidade na fabricação de geometrias complexas. Com isso, foi possível propor uma geometria com menor concentração de tensões.

Neste trabalho, foi feito uma busca na literatura e em normas que orientaram o desenvolvimento da metodologia. Através desta busca, foram adotadas as condições de contorno para as análises preliminares em elementos finitos. As análises foram feitas em três arranjos estruturais propostos. Após as análises, os resultados foram comparados e discutidos.

As análises mostraram que o arranjo estrutural com cavernas apresentou melhores resultados em relação a peso e rigidez global do vagão obtendo o menor deslocamento máximo. Também foi citado que estes resultados podem ser melhorados em futuros estudos através de otimizações e a divisão da geometria do vagão em sub-regiões. Dividindo em sub-regiões, diferentes espessuras de laminado poderão ser utilizadas em cada região otimizando o peso do material.

Para complementar as análises, estruturais, foram feitas outras discussões abrindo a problemática do vagão em compósitos para outros assuntos. Foi discutido sobre a fabricação, degradação dos materiais compósitos e seus modos de falha. E

finalizando as discussões complementares, foi feita uma análise de custo e suas discussões envolvidas.

Na fabricação foram retratadas as diferenças dos arranjos estruturais e seus efeitos na manufatura. Além disso, foi abordada a junção da longarina central no vagão sugerindo estudos para viabilizar a fabricação em materiais compósitos. Também foram sugeridas análises das uniões dos mecanismos de fechadura e dobradiça das tremonhas com o chão do vagão.

Na discussão sobre a degradação dos compósitos, foi abordado, principalmente, a sensibilidade destes materiais com radiação UV e umidade. Também foi discutido o ciclo de vida em fadiga dos compósitos. Após esta discussão, foram sugeridos estudos a respeito das cargas dinâmicas na estrutura da caixa do vagão. O estudo das cargas dinâmicas é fundamental na elaboração do ciclo de vida em fadiga dos materiais do vagão em compósitos. E com o ciclo de vida dos materiais do vagão, é possível planejar as futuras manutenções.

A análise de custo de produção do vagão apresentou uma grande variação de acordo com a escolha da resina e da espuma. Levando em conta que a combinação da resina poliéster com o núcleo de PET mostrou um custo muito abaixo dos outros, em futuras análises é sugerido verificar a influência desta opção no sentido estrutural e de degradação.

Como este trabalho é o começo de um projeto que ainda requer muitos estudos, as condições de contorno das análises foram consideradas somente com cargas estáticas. Estas condições foram suficientes para comparar os três arranjos estruturais. No entanto, em futuras análises, é sugerido aprimorar as condições de contorno e os critérios de falha. As condições de contorno podem ser aprimoradas considerando as cargas de impacto. E os critérios de falha podem ser mais específicos, com dados experimentais, podendo reduzir o fator de segurança considerado neste trabalho.

## REFERÊNCIAS

ABCOL. Cotação dos materiais compósitos. Informação pessoal de Amanda Pereira. E-mail recebido em: 8 jun. 2018.

AGY, Holding Corp. S-2 Glass®. Disponível em: <<http://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=881df8cd9bde4344820202eb6d1e7a39>>. Acesso em: 27 abr. 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA FERROVIÁRIA. **Estatística – Produção**. Disponível em: <[http://www.abifer.org.br/estatisticas\\_producao.aspx](http://www.abifer.org.br/estatisticas_producao.aspx)>. Acesso em: 07 maio 2017.

ANGELICO, R. **Avaliação de modelos de falhas progressivas para estruturas em materiais compósitos**. 2009. 84 p. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos, SP, 2009.

ASSOCIATION OF AMERICAN RAILROADS – **AAR Section C Part II: Manual of Standards and Recommended Practices Design, Fabrication, and Construction of Freight Cars, M-1001**. Washington, DC, United States of America: AAR, 2015.

BAIER A.; MAJZNER M. Application of feature based method in constructing innovative sheathing of railway wagons. **Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering**. Gliwice, Polônia, v. 52, n. 2, p. 91-98, 2012.

BRUNELLI, D. **Materiais compósitos polímeros**. In: VII ENCONTRO DE VERÃO DE FÍSICA DO ITA (EFITA). São José dos Campos, SP, 2012. 46 Slides, Color. Disponível em <<http://evfita.ita.br/evfita2012/apresentacoes/Deborah.pdf>>. Acesso em: 24 maio 2016.

CALLISTER, W. D. C. **Ciência e engenharia dos materiais uma introdução**. 7. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2007.

CAMPER. **Cargas e seus respectivos pesos específicos aproximados**. Brasília, Brasil, 2016. Disponível em: <<http://www.campertransportes.com/peso-especifico-graos>>. Acesso em: 23 abr.2018.

CAMPOS, M. O. **Estudo comparativo de pás para aerogeradores de grande porte fabricado em materiais compósitos reforçadas com fibra de carbono ou fibra de vidro**. 2013. 109 p. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais, Centro de Ciências Exatas da Terra, Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Natal, 2013.

CARVALHO, F. J. X. Tecnologia sob medida para sua empresa. competitividade na indústria de compósitos. **IBCom** Disponível em:

<[http://ibcomposites.com.br/Arquivos/Literatura/17-COMPETIVIDADE\\_NA\\_INDUSTRIA\\_DE\\_COMPOSITOS1.pdf](http://ibcomposites.com.br/Arquivos/Literatura/17-COMPETIVIDADE_NA_INDUSTRIA_DE_COMPOSITOS1.pdf)>. Acesso em: 27 mar.2017.

CAVALCANTI, F. **O que são vagões graneleiros**, Vagões ferroviários, 1992. Disponível em: < <http://vfco.brazilia.jor.br/vag/vagoes-graneleiros.shtml>>. Acesso em: 18 apr. 2018.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE - CNT. **Evolução da quantidade de vagões em circulação por concessionária - 2006 a 2015**. Disponível em: <<http://anuariodotransporte.cnt.org.br/Ferrovuario/2-4-2-/Opera%C3%A7%C3%A3o>>. Acesso em: 07 mai.2017.

COLONETTI, R. A. et al. **(Eco)Inovação e Ferrovias**. In: XV MOSTRA DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA, Pós-graduação, Pesquisa e Extensão da Universidade de Caxias do Sul. Caxias do Sul, RS. **Anais...** Disponível em <<http://www.ucs.br/etc/conferencias/index.php/mostraucsppga/xvmostrappga/paper/viewFile/4236/1354>>. Acesso em: 20 abr.2017.

COVINGTON, P. Lighter and more fuel efficient, boeing delivers the first 787 dreamliner. **TriplePundit**. sep.2011. Disponível em: <<http://www.triplepundit.com/2011/09/lighter-fuel-efficient-boeing-delivers-first-787-dreamliner/>>. Acesso em: 28.mar.2017.

DIAB, Inc. DIAB Klegecell® R 260 Rigid, Closed Cell PVC Foam Core Material. 2018. Disponível em: <<http://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=6a3c1888e753419a8702a aab9c6e04c3&ckck=1>>. Acesso em: 27 abr. 2018.

DIAB Group; Alstom Etr 675 Benefits from core composite solution, **Diab Group**, Laholm, Suécia. Disponível em: <<https://www.diabgroup.com/en-GB/Cases/Transport/Alstom-ETR-675-benefits-from-core-composite-solution>> Acesso em: 31 mar.2017.

DET NORSKE VERITAS (DNV). **Uni- and multi-axial multi-ply fabrics made of glass fibres – non metallic materials**. 2016. Disponível em: < <https://rules.dnvgl.com/docs/pdf/DNVGL/CP/2016-04/DNVGL-CP-0467.pdf> >. Acesso em 19.jun.2018.

DET NORSKE VERITAS (DNV). **Rules for Classification of High Speed, Light Craft**: Part 3 Structures, equipment. Chapter 4 Hull structural design, fibre composite and sandwich constructions. Edition January 2018. Disponível em: < <https://rules.dnvgl.com/docs/pdf/DNVGL/RU-HSLC/2018-01/DNVGL-RU-HSLC-Pt3Ch4.pdf> >. Acesso em: 19.jun.2018.

E-Composites. Cotação dos materiais consumíveis para fabricação do vagão em compósitos. Consumíveis. Disponível em: < [https://www.e-composites.com.br/categoria/2517987/CONSUMIVEIS/?nome\\_produto=&preco=&marc](https://www.e-composites.com.br/categoria/2517987/CONSUMIVEIS/?nome_produto=&preco=&marc) >

a=&frete\_gratis=0&lançamento=0&categoria=&ordenacao=az>. Acesso em: 9 jun. 2018.

EDMUNDS. **E-Class Flax, hemp, sisal, wool and other natural fibers are used to make 50 Mercedes-Benz E-Class components**. Special Report: Cars Made of Plants? 2009. Disponível em: <<https://www.edmunds.com/fuel-economy/special-report-cars-made-of-plants.html>>. Acesso em: 21 abr. 2017.

ETABLADES. **Photo Gallery**. Disponível em: <<http://www.etablades.com/>> Acesso em: 21 abr.2017.

EUROAÇOS. Comércio de ferro e aço. Chapas. Chapa Grossa. Disponível em: <<http://www.euroacos.com.br/chapas.html>> Acesso em: 9 jun.2018.

GBMX. **Galeria de imagens**. Vagão hopper. Disponível em: <<http://gbmx.com.br/negocios/vagao-hopper-hth/#gallery-8>>. Acesso em: 19 abr. 2018

GBMX. **Hopper**. Vagão hopper HTT. Disponível em: <<http://gbmx.com.br/tipos-negocios/vagoes/hopper/>>. Acesso em: 19 abr. 2018

GERDAU. Cotação do aço COR 500. Informação pessoal de Gabriel J Piccazzio dos Santos. E-mail recebido em: 11 jun. 2018.

HALE, J. Boeing 787 from the Ground Up, 2006. Aero Magazines; **Boeing**. Disponível em:<[http://www.boeing.com/commercial/aeromagazine/articles/qtr\\_4\\_06/AERO\\_Q406\\_article4.pdf](http://www.boeing.com/commercial/aeromagazine/articles/qtr_4_06/AERO_Q406_article4.pdf)> Acesso em: 21 abr.2017.

HELMS, H.; LAMBRECHT, U. **The potential contribution of light-weighting to reduce transport energy consumption**. Heidelberg, Germany: Institute for Energy and Environmental Research (IFEU), Heidelberg, Alemanha, 2006. Disponível em: <[https://www.ifeu.de/verkehrundumwelt/pdf/Helms\(2006\)\\_light-weighting.pdf](https://www.ifeu.de/verkehrundumwelt/pdf/Helms(2006)_light-weighting.pdf)> Acesso em: 29 abr.2017.

HOLBERY, J.; HOUSTON, D. Natural-fiber-reinforced polymer composites in automotive applications, overview low-cost composites in vehicle manufacture. **The Journal of The Minerals, Metals & Materials Society (TMS)**, v. 58, n. 11, p. 80–86, 2006.

KENSCHKE. Fatigue of composites for wind turbines. **International Journal of Fatigue**, The Third International Conference on Fatigue of Composites, v. 28, n,10, p. 1363-1374, 2006.

KONIG, R.; HECHT, M. **White paper innovative rail freight wagon 2030**. Public and Urban Transport - TU Dresden, Department Rail Vehicles - TU Berlin. Desdren, Germany, 2012. Disponível em: <[https://www.schienevzg.tu-berlin.de/fileadmin/fg62/Dokumente/Downloads/White\\_Paper\\_Innovative\\_Rail\\_Freight\\_Wagon\\_2030.pdf](https://www.schienevzg.tu-berlin.de/fileadmin/fg62/Dokumente/Downloads/White_Paper_Innovative_Rail_Freight_Wagon_2030.pdf)>. Acesso em: 18 mar.2017.

MARSH, G. Composites flying high (Part 1). **Materials Today**. 8 abr.2014. Disponível em: <<http://www.materialstoday.com/composite-applications/features/composites-flying-high-part-1/>>. Acesso em: 07 mai.2017.

OLIVEIRA, A. G. et al. Desenvolvimento de vagão graneleiro em compósitos. **IBCom**, 23 Slides, Color. 2012. Disponível em: <[http://ibcomposites.com.br/Arquivos/Literatura/8-FEIPAR\\_VAGAOGRANELEIRO.pdf](http://ibcomposites.com.br/Arquivos/Literatura/8-FEIPAR_VAGAOGRANELEIRO.pdf)>. Acesso em 21 abr.2017.

OWENS CORNING. **Mercado Náutico**. Disponível em: <<http://www.owenscorning.com.br/pt-br/compositos-mercados-produto?id=29>>. Acesso em: 28.mar.2017.

PEREIRA, J. C. **Curso de projeto estrutural com materiais compostos**. Material pedagógico. 115 p. Grupo de Análise e Projeto Mecânico, Departamento de Engenharia Mecânica , Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2005.

PIMASSONI, S. **Manutenção de vagões e carro de passageiros**: Trilha técnica: Prepare-se para o futuro! Valer-Educação Vale. nov. 2010.

QUINTINO E. **Sistema de vagões**. Belo Horizonte: VALE. 2008.

RANDOM. Informação sobre a fabricação dos vagões Gôndola e Hopper. Informação pessoal de Andre Adami Viel. E-mail recebido em: 13 abr. 2016.

RUMO. **Frota**. Disponível em: <[http://pt.rumolog.com/arquivos/ALL\\_TP\\_HFT.pdf](http://pt.rumolog.com/arquivos/ALL_TP_HFT.pdf)>. Acesso em: 20 apr. 2018.

SERGEICHEV I.V. et al. **Structural design and optimization of vacuum infusion manufacturing process for the fiberglass hopper car body**, In: 16<sup>TH</sup> EUROPEAN CONFERENCE ON COMPOSITE MATERIALS, Seville, Spain, 22-26 jun. 2014 **Anais...**

SHIGLEY, J. E.; MISCHKE, C.R. BUDYNAS, R.G. **Projeto de engenharia mecânica**. 7. ed. Porto Alegre : ARTMED, 2005.

VATALARO, M. Solving the solvent issue. **BoatU.S.**, Alexandria, VA, United States of America, 2016. Disponível em: <<http://www.boatus.com/magazine/2016/february/how-boats-are-built.asp>>. Acesso em: 28 mar. 2017.

VALE. **Sitrans** – Sistema de Transporte. Atual: **Unilog**. 2008

WENNBERG D. **Light-weighting methodology in rail vehicle design through introduction of load carrying sandwich panels**. 2011. 29 p. Licentiate Thesis - Centre for Eco2 Vehicle Design, Department of Aeronautical and Vehicle Engineering, Royal Institute of Technology (KTH), Stockholm, 2011.

WICHITA. Wichita Rail Services. Freight Car Parts. Welcome to our freight car parts catalog; Wichita, KS, United States of America. Disponível em: <<http://www.wichitarailway.com/PartsCatalog/d124025.aspx>>. Acesso em: 9 jul. 2018

WICHITA. **UV degradation prevention on fiber-reinforced composite blades**. 2009. Department of Mechanical Engineering; Wichita State University, 1845 Fairmount WICHITA, KS, United States of America. Disponível em: <<https://pdfs.semanticscholar.org/presentation/e16f/0fce624cd7720208deda34eb315c0f9e8e62.pdf>>. Acesso em: 8 jun. 2018