

**UNIVERSIDADE DE CAXIAS DO SUL**  
**ÁREA DO CONHECIMENTO DE CIÊNCIAS EXATAS E ENGENHARIAS**

**JONATAN DE ALMEIDA**

**DESENVOLVIMENTO E ANÁLISE PELO MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS  
DE UM SUPORTE HÍBRIDO METAL-POLÍMERO APLICADO A UM TANQUE DE  
COMBUSTÍVEL VEICULAR**

**CAXIAS DO SUL**

**2019**

**JONATAN DE ALMEIDA**

**DESENVOLVIMENTO E ANÁLISE PELO MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS  
DE UM SUPORTE HÍBRIDO METAL-POLÍMERO APLICADO A UM TANQUE DE  
COMBUSTÍVEL VEICULAR**

Trabalho de conclusão de curso apresentado à  
Universidade de Caxias do Sul como requisito  
parcial à obtenção do grau de Engenheiro  
Mecânico. Área de concentração: Mecânica  
dos Sólidos.

Orientador: Prof. Me. Eng. Adelair Lino  
Colombo

**CAXIAS DO SUL**

**2019**

**JONATAN DE ALMEIDA**

**DESENVOLVIMENTO E ANÁLISE PELO MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS  
DE UM SUPORTE HÍBRIDO METAL-POLÍMERO APLICADO A UM TANQUE DE  
COMBUSTÍVEL VEICULAR**

Trabalho de conclusão de curso apresentado à  
Universidade de Caxias do Sul como requisito  
parcial à obtenção do grau de Engenheiro  
Mecânico. Área de concentração: Mecânica dos  
Sólidos.

**Aprovado(a) em: 03/07/2018**

**Banca examinadora**

Prof. Me. Eng. Adelaír Lino Colombo  
Universidade de Caxias do Sul – UCS

Prof. Me. Eng. André Alaniz Cesario  
Universidade de Caxias do Sul – UCS

Prof. Me. Eng. Victor Hugo Velazquez Acosta  
Universidade de Caxias do Sul – UCS

## RESUMO

Este trabalho tem o objetivo principal de inovar em termos de materiais e processos envolvidos na fabricação de um suporte de tanque de combustível de um veículo pesado. Atualmente esse tipo de componente automotivo é fabricado integralmente em aço, por processos convencionais como estampagem e solda. Entretanto, com a evolução tecnológica no mercado automotivo foi proposto um desenvolvimento diferente deste componente em questão. Visando o uso de tecnologias de materiais híbridas com metal e polímero em um mesmo elemento estrutural, e o emprego de processos de fabricação de alta produtividade como moldagem por injeção, o componente híbrido foi desenvolvido e analisado virtualmente pelo Método dos Elementos Finitos em diferentes condições de análise estática e modal. Os resultados obtidos na análise estática foram satisfatórios e indicam que o uso da tecnologia híbrida tem potencial para ser utilizada em novos projetos. Na análise modal, foram observados valores de frequências naturais baixos na maioria dos casos, e torna-se necessário um estudo mais aprofundado dos efeitos que esses resultados podem causar em campo.

**Palavras-chave:** Método dos Elementos Finitos, Tecnologia Híbrida Metal e Polímero e Análise Estrutural.

## ABSTRACT

This main objective of this work was the innovating in terms of the materials and processes involved in the manufacture of a fuel tank holder of a heavy vehicle. Currently this type of automotive component is manufactured entirely in steel, by conventional processes such as stamping and welding. However, with the technological evolution in the automotive market, a different development of this component was proposed. Aiming the use of hybrid materials technologies with metal and polymer in the same structural element and the use of high productivity manufacturing processes as injection molding, the hybrid component was developed and analyzed by the Finite Element Method in different analysis conditions static and modal. The results obtained in the static analysis were satisfactory and indicate that the use of hybrid technology has the potential to be used in new projects. In modal analysis, low natural frequencies were observed in most cases and a more in-depth study of the effects these results can cause in the field is required.

**Keywords:** Finite Element Method, Hybrid Metal and Polymer Technology and Structural Analysis.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Exemplo de chassi com sistema de armazenamento de combustível .....	9
Figura 2 – Representação dos limites de tensão da teoria de distorção máxima.....	15
Figura 3 – Método geral para análise de sistemas discretos.....	17
Figura 4 – Malha de elementos finitos de um suporte de tanque de combustível.....	18
Figura 5 – Tipos de elementos finitos .....	19
Figura 6 – Diagrama tensão-deformação: comportamento linear .....	21
Figura 7 – Diagrama tensão-deformação: comportamento não linear elástico .....	21
Figura 8 – Diagrama tensão-deformação: comportamento não linear devido a plasticidade...	22
Figura 9 – Carregamento dinâmico de um conjunto tanque de combustível .....	24
Figura 10 – Classificação hierárquica de compósitos sintéticos e naturais.....	26
Figura 11 – Curvas tensão-alongamento para poliamida GF50 .....	27
Figura 12 – Grânulos de polímeros reforçados com fibra de vidro.....	28
Figura 13 – Influência das propriedades do compósito GFRP em função da direção dos carregamentos .....	28
Figura 14 – Tensões em um GRFP.....	29
Figura 15 – Exemplo de estrutura automotiva: (a) 100% aço e (b) componente híbrido .....	30
Figura 16 – Exemplo de estrutura híbrida presente em um módulo frontal.....	31
Figura 17 – Tecnologia PMH com moldagem por injeção .....	32
Figura 18 – Exemplo de processo de junção de estruturas híbridas: <i>staking</i> .....	32
Figura 19 – Intertravamento mecânico com adesão direta.....	34
Figura 20 – Tecnologia com o uso de primer silano com adesão direta .....	35
Figura 21 – Esquemático de dois conceitos da tecnologia <i>clinch-lock</i> com adesão direta .....	35
Figura 22 – Fluxograma de fases e entregas principais.....	36
Figura 23 – Montagem conjunto e suporte de tanque metálico.....	37
Figura 24 – Conjunto suporte metálico .....	37
Figura 25 – Idealização do tanque de combustível.....	38
Figura 26 – Malha do suporte metálico .....	39
Figura 27 – Eixos de coordenadas .....	40
Figura 28 – Diferentes níveis de combustível .....	41
Figura 29 – Detalhamento da seção da alma metálica.....	41
Figura 30 – Componentes do suporte híbrido .....	42
Figura 31 – Detalhamento da alma curta.....	42

Figura 32 – Detalhamento dos insertos suporte híbrido .....	43
Figura 33 – Vista lateral suporte híbrido .....	43
Figura 34 – Suporte híbrido com alma longa .....	44
Figura 35 – Comportamento não linear elástico do polímero .....	46
Figura 36 – Parâmetro de contato entre metal e polímero.....	46
Figura 37 – Malha suporte híbrido alma curta .....	47
Figura 38 – Tensões resultantes para acelerações de +3,5G em X e -1,0G em Z.....	49
Figura 39 – Deslocamentos resultantes para acelerações de +3,5G em X e -1,0G em Z.....	50
Figura 40 – Tensões resultantes para acelerações de +3,5G em Y e -1,0G em Z.....	50
Figura 41 – Deslocamentos resultantes para acelerações de +3,5G em Y e -1,0G em Z.....	51
Figura 42 – Tensões resultantes para aceleração de +2,5G em Z.....	51
Figura 43 – Deslocamentos resultantes para aceleração de +2,5G em Z .....	52
Figura 44 – Tensões resultantes para aceleração de -3,5G em Z .....	52
Figura 45 – Deslocamentos resultantes para aceleração de -3,5G em Z.....	53
Figura 46 – Tensões resultantes para acelerações de +3,5G em X e -1,0G em Z.....	54
Figura 47 – Tensões resultantes para acelerações de +3,5G em X e -1,0G em Z.....	55
Figura 48 – Tensões resultantes para acelerações de +3,5G em X e -1,0G em Z.....	55
Figura 49 – Deslocamentos resultantes para acelerações de +3,5G em X e -1,0G em Z.....	56
Figura 50 – Tensões resultantes para acelerações de +3,5G em X e -1,0G em Z.....	57
Figura 51 – Tensões resultantes para acelerações de +3,5G em X e -1,0G em Z.....	57
Figura 52 – Tensões resultantes para acelerações de +3,5G em X e -1,0G em Z.....	58
Figura 53 – Deslocamentos resultantes para acelerações de +3,5G em X e -1,0G em Z.....	58
Figura 54 – Tensões resultantes para acelerações de +3,5G em Y e -1,0G em Z.....	59
Figura 55 – Tensões resultantes para acelerações de +3,5G em Y e -1,0G em Z.....	59
Figura 56 – Deslocamentos resultantes para acelerações de +3,5G em Y e -1,0G em Z.....	60
Figura 57 – Tensões resultantes para aceleração de 2,5G em Z.....	60
Figura 58 – Tensões resultantes para aceleração de 2,5G em Z.....	61
Figura 59 – Deslocamentos resultantes para aceleração de 2,5G em Z .....	61
Figura 60 – Tensões resultantes para aceleração de -3,5G em Z .....	62
Figura 61 – Tensões resultantes para aceleração de -3,5G em Z .....	62
Figura 62 – Deslocamentos resultantes para aceleração de -3,5G em Z.....	63
Figura 63 – Tensões resultantes para acelerações de +3,5G em X e -1,0G em Z.....	64
Figura 64 – Tensões resultantes para acelerações de +3,5G em X e -1,0G em Z.....	65
Figura 65 – Tensões resultantes para acelerações de +3,5G em X e -1,0G em Z.....	65

Figura 66 – Deslocamentos resultantes para acelerações de +3,5G em X e -1,0G em Z.....	65
Figura 67 – Tensões resultantes para acelerações de +3,5G em Y e -1,0G em Z.....	66
Figura 68 – Tensões resultantes para acelerações de +3,5G em Y e -1,0G em Z.....	66
Figura 69 – Deslocamentos resultantes para acelerações de +3,5G em Y e -1,0G em Z.....	67
Figura 70 – Tensões resultantes para aceleração de 2,5G em Z.....	67
Figura 71 – Tensões resultantes para aceleração de 2,5G em Z.....	68
Figura 72 – Deslocamentos resultantes para aceleração de 2,5G em Z .....	68
Figura 73 – Tensões resultantes para aceleração de -3,5G em Z .....	69
Figura 74 – Tensões resultantes para aceleração de -3,5G em Z .....	69
Figura 75 – Deslocamentos resultantes para aceleração de -3,5G em Z.....	70



## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Propriedades mecânicas do suporte metálico .....	38
Tabela 2 – Casos de carregamento estático .....	39
Tabela 3 – Propriedades de inércia do tanque e diesel para o suporte de aço .....	40
Tabela 4 – Propriedades mecânicas do suporte híbrido alma curta.....	42
Tabela 5 – Propriedades mecânicas da alma longa metálica.....	44
Tabela 6 – Massas obtidas nos diferentes projetos.....	44
Tabela 7 – Propriedades de inércia do tanque e diesel para o suporte híbrido.....	48
Tabela 8 – 2° modo e frequências naturais do suporte de aço.....	54
Tabela 9 – 1° modo e frequências naturais do suporte híbrido alma longa.....	63
Tabela 10 – 1° modo e frequências naturais do suporte híbrido alma longa II.....	70
Tabela 11 – Comparativo de resultados: análise estática .....	71
Tabela 12 – Comparativo de resultados: análise modal .....	71

## LISTA DE ABREVIATURAS

3D	<i>Espaço Tridimensional</i>
CAD	<i>Computer Aided Design</i>
GRFP	<i>Glass Fiber-reinforced Polymeric</i>
LESA	<i>Low-energy Surface Adhesive</i>
MEF	<i>Método dos Elementos Finitos</i>
PEAD	<i>Polietileno de Alta Densidade</i>
PMH	<i>Polymer Metal Hybrid</i>

## LISTA DE SÍMBOLOS

$\sigma'$	Tensão equivalente de von Mises
$\sigma_1$	Tensão máxima principal
$\sigma_2$	Tensão média principal
$\sigma_3$	Tensão mínima principal
$u$	Energia de distorção
$\sigma_3$	Tensão principal 3
$\sigma_e$	Tensão limite de escoamento
$\sigma$	Tensão
$\varepsilon$	Deformação
$\sigma_p$	Tensão limite de proporcionalidade
$\varepsilon_y$	Deformação limite de proporcionalidade
$E$	Módulo de elasticidade
$E_x$	Módulo de elasticidade no eixo x
$E_y$	Módulo de elasticidade no eixo y
$E_z$	Módulo de elasticidade no eixo z
$\nu$	Coefficiente de Poisson
$\rho$	Densidade

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	9
1.1	AMBIENTE DE TRABALHO .....	10
1.2	JUSTIFICATIVA DO TRABALHO .....	10
1.3	OBJETIVOS DO TRABALHO .....	11
<b>1.3.1</b>	<b>Objetivo geral</b> .....	11
<b>1.3.2</b>	<b>Objetivos específicos</b> .....	11
<b>2</b>	<b>REFERENCIAL TEÓRICO</b> .....	12
2.1	TRABALHOS RELACIONADOS .....	12
2.2	RESISTÊNCIA DOS MATERIAIS .....	13
<b>2.2.1</b>	<b>Critérios de falha</b> .....	14
2.2.2.1	Materiais dúcteis e a teoria de von Mises-Hencky .....	14
2.3	ELEMENTOS FINITOS .....	15
<b>2.3.1</b>	<b>Idealização de sistemas e modelos discretizados</b> .....	16
<b>2.3.2</b>	<b>Método geral para análise de sistemas discretos</b> .....	16
<b>2.3.3</b>	<b>Tipo de estrutura</b> .....	17
<b>2.3.4</b>	<b>Tipo de elemento</b> .....	19
<b>2.3.5</b>	<b>Tipos de análise</b> .....	19
2.3.5.1	Análise linear.....	19
2.3.5.2	Análise não linear .....	20
2.3.5.2.1	<i>Não linearidades associada ao material</i> .....	20
2.3.5.2.2	<i>Não linearidades associadas a grandes deformações</i> .....	22
2.3.5.2.3	<i>Não linearidades associadas a alterações de geometria</i> .....	22
2.3.5.2.4	<i>Não linearidades associadas à mudança das condições de contorno</i> .....	22
2.3.5.3	Análise estática.....	23
2.3.5.4	Análise dinâmica .....	23
2.3.5.4.1	<i>Análise modal</i> .....	25
<b>2.4.1</b>	<b>Poliamida</b> .....	26
<b>2.4.2</b>	<b>Compósitos polímeros reforçados com fibra de vidro</b> .....	27
2.4.2.1	Critérios de falha nos GRFP .....	29
2.5	ESTRUTURAS HÍBRIDAS DE POLÍMERO E METAL .....	30
<b>2.5.1</b>	<b>Tecnologia PMH com moldagem por injeção</b> .....	31

2.5.2	<b>Tecnologia PMH com operações secundárias de junção</b> .....	32
2.5.3	<b>Tecnologia PMH com ligação adesiva</b> .....	33
2.5.4	<b>Tecnologia PMH com adesão direta</b> .....	33
2.5.4.1	Tecnologia PMH com adesão direta por intertravamento mecânico.....	34
2.5.4.2	Tecnologia PMH com adesão direta por promotor químico .....	34
2.5.4.3	Tecnologia PMH com adesão direta por modificação química.....	35
2.5.4.4	Tecnologia PMH com adesão direta <i>clinch-lock</i> .....	35
<b>3</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	<b>36</b>
3.1	ANÁLISE MEF DO SUPORTE EM AÇO.....	37
3.1.1	<b>Análise estática do suporte em aço</b> .....	37
3.1.2	<b>Análise modal: suporte em aço</b> .....	40
3.2	DESENVOLVIMENTO DO MODELO 3D HÍBRIDO ALMA CURTA.....	41
3.3	DESENVOLVIMENTO MODELO 3D HÍBRIDO ALMA LONGA .....	43
3.4	ANÁLISE MEF SUPORTE HÍBRIDO ALMA CURTA .....	45
3.4.1	<b>Análise estática do suporte híbrido alma curta</b> .....	45
3.4.2	<b>Análise modal do suporte híbrido alma curta</b> .....	47
3.5	ANÁLISE MEF SUPORTE HÍBRIDO ALMA LONGA I .....	48
3.6	ANÁLISE MEF SUPORTE HÍBRIDO ALMA LONGA II.....	48
<b>4</b>	<b>RESULTADOS</b> .....	<b>49</b>
4.1	ANÁLISE MEF SUPORTE DE AÇO .....	49
4.1.1	<b>Análise estática suporte de aço: caso de carregamento 1</b> .....	49
4.1.2	<b>Análise estática suporte de aço: caso de carregamento 2</b> .....	50
4.1.3	<b>Análise estática suporte de aço: caso de carregamento 3</b> .....	51
4.1.4	<b>Análise estática suporte de aço: caso de carregamento 4</b> .....	52
4.1.5	<b>Análise modal: suporte de aço</b> .....	53
4.2	ANÁLISE MEF SUPORTE HÍBRIDO ALMA CURTA .....	54
4.2.1	<b>Análise estática suporte híbrido alma curta: caso de carregamento 1</b> .....	54
4.3	ANÁLISE MEF SUPORTE HÍBRIDO ALMA LONGA I .....	56
4.3.1	<b>Análise estática suporte híbrido alma longa I: caso de carregamento 1</b> .....	56
4.3.2	<b>Análise estática suporte híbrido alma longa I: caso de carregamento 2</b> .....	58
4.3.3	<b>Análise estática suporte híbrido alma longa I: caso de carregamento 3</b> .....	60
4.3.4	<b>Análise estática suporte híbrido alma longa I: caso de carregamento 4</b> .....	61

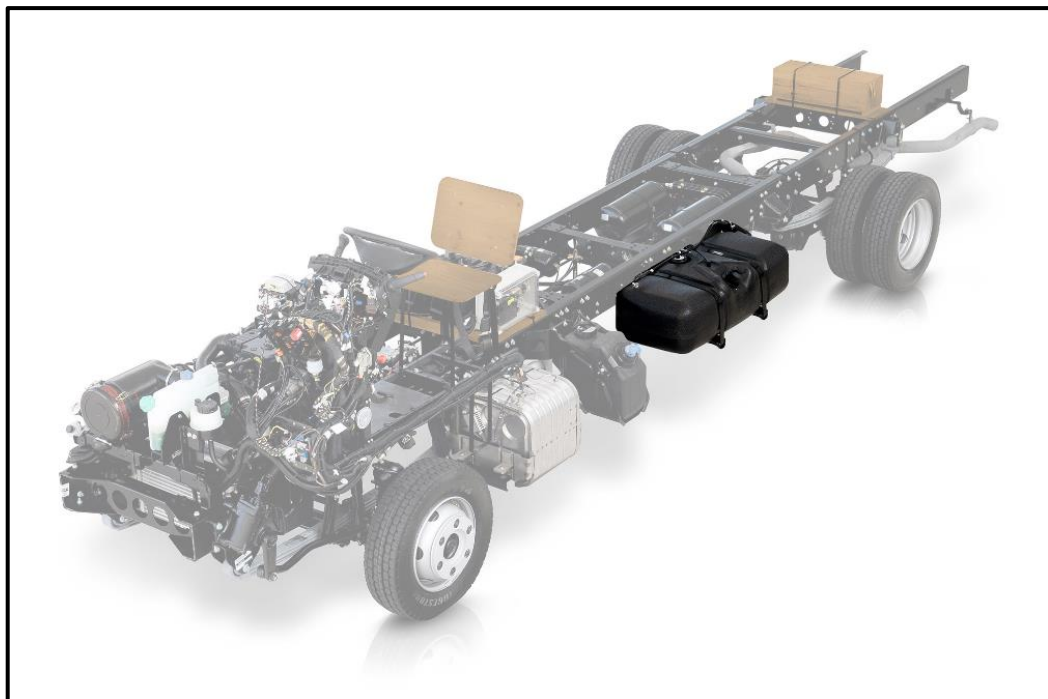
4.3.5	<b>Análise modal: suporte híbrido alma longa I.....</b>	63
4.4	<b>ANÁLISE MEF SUPORTE HÍBRIDO ALMA LONGA II.....</b>	63
4.4.1	<b>Análise estática suporte híbrido alma longa II: caso de carregamento 1.....</b>	64
4.4.2	<b>Análise estática suporte híbrido alma longa II: caso de carregamento 2.....</b>	66
4.4.3	<b>Análise estática suporte híbrido alma longa II: caso de carregamento 3.....</b>	67
4.4.4	<b>Análise estática suporte híbrido alma longa II: caso de carregamento 4.....</b>	68
4.4.5	<b>Análise modal: suporte híbrido alma longa II.....</b>	70
4.5	<b>COMPARATIVO DE RESULTADOS .....</b>	70
5	<b>CONCLUSÃO.....</b>	73
5.1	<b>SUGESTÃO DE TRABALHOS FUTUROS.....</b>	74
	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	75

## 1 INTRODUÇÃO

O mercado automotivo, especificamente na linha pesada, vem crescendo de forma cada vez mais acelerada, a cada ano que se passa, novas tecnologias são descobertas e empregadas no segmento. A busca da excelência em cada produto faz com que as principais montadoras do mundo desenvolvam projetos cada vez mais eficientes, tendo que explorar novas tecnologias, materiais e processos.

Para um projeto veicular ter sucesso é vital que cada subcomponente seja cuidadosamente projetado. Um componente vital para o funcionamento do caminhão é o sistema de armazenamento de combustível montado ao chassi do veículo e representado na figura 1. Sua função básica é armazenar o combustível, neste caso, o diesel para dar a autonomia necessária para o veículo trafegar uma certa distância sem haver necessidade de reabastecimento.

Figura 1 – Exemplo de chassi com sistema de armazenamento de combustível



Fonte: Adaptado Site Mercedes-Benz Brasil (2018).

Com o passar dos anos os tanques de combustíveis foram ganhando tecnologia através da exploração de novos materiais e processos de fabricação, inicialmente estes eram fabricados em aço carbono através de processos de conformação mecânica como calandragem e estampagem e união por soldagem. Após essa fase, foram desenvolvidos tanques em materiais

poliméricos produzidos por meio do processo de sopro utilizando como matéria prima base o polímero Polietileno de Alta Densidade (PEAD). Este avanço tecnológico possibilitou a exploração de geometrias complexas nas quais foi possível otimizar questões de espaço ocupado e redução de massa, além da grande vantagem quanto à resistência à oxidação.

Entretanto, um componente que não sofreu grandes avanços tecnológicos foi o sistema de suportes do tanque de combustível, empregando o uso de aço carbono em todos os casos. Neste contexto, almeja-se um novo conceito na concepção e desenvolvimento deste componente, que é o centro de estudo deste trabalho.

## 1.1 AMBIENTE DE TRABALHO

O trabalho foi desenvolvido na empresa Bepo Componentes Automotivos no setor de desenvolvimento de produto, localizada em São Marcos – RS. A empresa atua a mais de 50 anos no ramo de acessórios e componentes automotivos para linha leve e pesada, sendo pioneira na fabricação de tanques de combustível poliméricos no Brasil.

## 1.2 JUSTIFICATIVA DO TRABALHO

Neste trabalho o autor em parceria com o seu empregador, a Bepo Componentes Automotivos, desenvolveu o modelo matemático tridimensional de um suporte de tanque de combustível visando utilizar como matéria prima polímero e metal em sua composição estrutural. A fabricação do componente é feita através do processo de moldagem por injeção. A análise da integridade estrutural do componente foi realizada por meios computacionais através do Método dos Elementos Finitos (MEF).

Um resultado positivo nas diferentes análises estruturais realizadas pode disponibilizar o emprego da tecnologia em projetos futuros da empresa, gerando uma grande inovação perante aos padrões do mercado atual, em termos de materiais e processos de fabricação do produto em estudo.

O uso de material polimérico pode trazer inúmeras vantagens, com uma redução de massa estimada em 20% contribuirá diretamente na performance do veículo, simplificação do processo de produção do componente onde a moldagem por injeção irá substituir praticamente todos os processos necessários para a fabricação do componente atual em aço, eliminando operações como estampo, montagem, soldagem e pintura.



Propriedades químicas como a resistência à oxidação do componente também se apresenta como vantagem, uma vez que o polímero possui grande resistência em relação ao aço.

### 1.3 OBJETIVOS DO TRABALHO

#### 1.3.1 Objetivo geral

Desenvolver e analisar pelo MEF o modelo de um suporte de tanque de combustível híbrido, prevendo o uso de material polimérico em sua composição combinando com um elemento estrutural interno metálico.

#### 1.3.2 Objetivos específicos

- a) Analisar por meio do MEF a integridade estrutural do suporte em aço (atual);
- b) Projetar o modelo de um suporte híbrido metal-polímero;
- c) Estabelecer condições de carregamento e contorno aproximando os diferentes modelos à realidade de aplicação;
- d) Analisar por meio do MEF a integridade estrutural dos diferentes modelos híbridos;
- e) Analisar e comparar os resultados obtidos das análises estática e modal, nos diferentes modelos de suporte metálico e híbrido.

## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

Neste capítulo é apresentada a fundamentação teórica para desenvolvimento do tema do trabalho proposto. O referencial bibliográfico é alicerce aos avanços do trabalho onde serão abordados temas na área de elementos finitos, materiais poliméricos, mecânica dos sólidos e tecnologia de produtos envolvendo estruturas híbridas.

### 2.1 TRABALHOS RELACIONADOS

Ghodake e Patil (2013) realizaram um estudo visando substituir o material de uma mola veicular originalmente em aço por um compósito, neste caso fibra de vidro e resina poliéster. A resistência mecânica é comparada através da análise MEF do componente em ambos materiais pelo *software* ANSYS analisando resultados de deflexão, energia de deformação e tensão. Em termos de deflexão o compósito sofreu maiores deslocamentos e as tensões resultantes foram menores. Os resultados foram positivos uma vez que a mola fabricada com o compósito demonstrou maiores valores em termos de energia de deformação máxima além de reduzir em até 85% a massa se comparado ao componente de aço.

Chandra, Sreenivasulu, Hussain (2012) descreveram que o principal problema da indústria automobilística é a redução de massa, com esse intuito realizam um estudo por meio do MEF visando empregar um material compósito em um chassi de um veículo pesado. Avalia-se o uso de três compósitos diferentes: Compósito com fibra de carbono/resina epóxi, compósito com fibra de vidro tipo E/resina epóxi e compósito com fibra de vidro tipo S/resina epóxi. No estudo também são avaliados três tipos de seções transversais. Na análise compara-se o chassi em material compósito com o chassi em aço, em termos de deflexão e tensão. Na conclusão, nota-se uma redução de 73 a 80% na massa ao empregar o uso de compósitos, onde o chassi em compósito de fibra de carbono/resina epóxi com seção transversal tipo “I”, mostrou uma resistência mecânica superior em relação ao componente de aço e os outros compósitos estudados.

Drössler *et al.* (2018) apresentaram um novo conceito de ferramental e tecnologia de estruturas híbridas automotivas envolvendo metal e polímero. Justificando que o aço está no limite em soluções que envolvem estruturas de impacto e a indústria automotiva precisa encontrar métodos de desenvolvimento inteligentes, não somente com redução de massa, mas também desenvolvendo processos de fabricação economicamente viáveis com capacidade de

grandes volumes de produção. O trabalho foi desenvolvido à partir de uma investigação das principais tecnologias inovadoras envolvendo processos de fabricação híbridos com o intuito de desenvolver uma nova solução combinando vantagens à partir dessas tecnologias anteriormente desenvolvidas, com isso elaboram novas soluções a quais denominam-se tecnologia híbrida 3D. A tecnologia envolve o uso de uma estrutura principal estampada metálica, um reforço termoplástico com fibra de vidro moldado por injeção, uma folha polimérica orgânica e um agente ligante para esses diferentes componentes envolvendo um novo conceito de ferramental para o processamento do componente. A tecnologia foi aplicada em uma coluna de um chassi veicular, comparado a uma coluna convencional, obteve-se uma redução de 14% na massa e a absorção da energia de impacto aumentou 25%, além da redução no número de peças.

Silva (2014) realizou um estudo em um suporte de coxim de motor visando substituir a matéria prima original por um compósito de poliamida com fibra de vidro. No trabalho foi feita uma análise estrutural do componente alternativo estudando seu comportamento à fadiga em diferentes temperaturas de trabalho e cargas de fibra de vidro, além da execução de ensaios mecânicos e simulações computacionais. Na comparação dos resultados obtidos de forma experimental e na simulação computacional notou-se similaridades nas tensões obtidas, porém as deflexões no método numérico foram maiores. O autor conclui que o material compósito é uma boa alternativa para substituição do presente material em alumínio em termos estruturais, proporcionando uma redução de massa de 32% e melhora no desempenho dos automóveis

Schutt (2014) realizou um estudo sobre o uso da tecnologia de substituição de peças metálicas por compósitos poliméricos, no trabalho demonstra-se a constante necessidade de o mercado automotivo encontrar soluções para se manter competitivo. São apresentadas diversas aplicações e tecnologias envolvendo polímeros e materiais compósitos, muitas, em aplicações estruturais que requerem grandes solicitações mecânicas. São expostas as vantagens e desvantagens do uso dessa matéria prima, bem como a avaliação de suas propriedades e performance em diferentes aplicações.

## 2.2 RESISTÊNCIA DOS MATERIAIS

Segundo Hibbeler (2004) a resistência dos materiais estuda a relação entre as cargas externas aplicadas sob um corpo deformável e as forças internas que o mesmo reage sob uma determinada condição de carga. Os cálculos da deformação sofrida por um corpo proporcionam

estudar a estabilidade do mesmo quando sujeito à essas ações. Essa área da mecânica é a base para qualquer desenvolvimento de um projeto de engenharia mecânica.

### 2.2.1 Critérios de falha

Segundo Hibbeler (2004), ao dimensionar-se um projeto é necessário estabelecer o limite superior de tensão em que o material irá falhar, no caso de material dúcteis essa falha se dá por escoamento e em frágeis por ruptura, estes modos de falha que são praticados em um elemento sujeito à um estado uniaxial de tensões. No caso de estados multiaxiais, o engenheiro deve prever o uso de teorias específicas, inicialmente calculando as tensões normais e cisalhantes máximas no elemento a partir da teoria da elasticidade.

#### 2.2.2.1 Materiais dúcteis e a teoria de von Mises-Hencky

Hibbeler (2004) descreve que, ao passo que um material se deforma, este tende a armazenar energia interna em todo o seu volume, essa energia de distorção ( $u$ ) pode ser relacionada a um critério de falha. O elemento de volume do material é sujeito às tensões principais  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$  e  $\sigma_3$ , onde o somatório de cada uma dessas tensões representa uma porção da densidade de energia de distorção total. Os limites da teoria estão representados na figura 2, e sua fórmula geral para um estado multiaxial de tensões está representada através da equação (1).

$$\sigma' = \sqrt{\frac{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2}{2}} \quad (1)$$

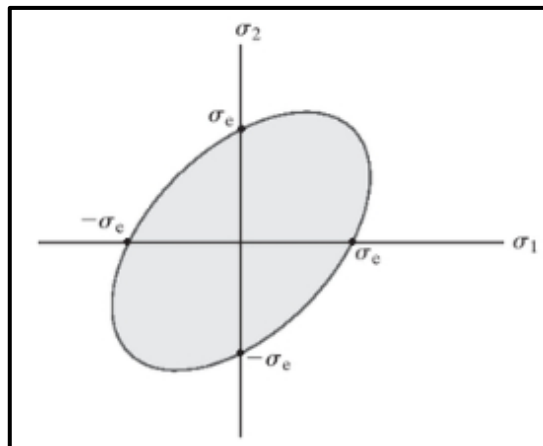
onde:  $\sigma'$  é a tensão equivalente de von Mises;

$\sigma_1$  é a tensão máxima principal;

$\sigma_2$  é a tensão média principal;

$\sigma_3$  é a tensão mínima principal;

Figura 2 – Representação dos limites de tensão da teoria de distorção máxima



Fonte: Hibbeler (2004).

### 2.3 ELEMENTOS FINITOS

Em termos de engenharia, o Método dos Elementos Finitos (MEF) é um grande recurso para projetos com alto grau de complexidade, através deste método e combinado com os conhecimentos adequados da área, o engenheiro pode avaliar estruturalmente um componente em inúmeras condições de operação, garantindo resultados de forma satisfatória e com previsibilidade. Método esse que, caso não existisse, dificultaria muito esses estudos se avaliados de forma analítica.

Alves Filho (2012) explica que os métodos analíticos clássicos baseados no estudo das equações diferenciais e expressos por meio de teorias específicas na área de resistência dos materiais permitem cálculos de resposta exata dos deslocamentos, deformações e tensões em uma estrutura. Entretanto, são limitados em casos específicos e fogem da maioria das aplicações práticas no cotidiano, gerando resultados pouco acurados. Neste contexto é necessário o uso de procedimentos aplicados em caráter geral, independente da forma e condição de carregamento imposta no elemento estrutural, teoria esta que aborda o MEF. Com essa técnica numérica é possível prever e analisar o comportamento estrutural de uma determinada condição de operação ou componente complexo (ALVES FILHO, 2012).

A rigidez total de uma estrutura depende da rigidez de cada elemento individualmente. Nos softwares MEF existem modelos de rigidez que representam diferentes comportamentos físicos, uma viga por exemplo é representada em termos de rigidez axial, rigidez a flexão, ao cisalhamento, à torção, etc. Esse modelo é descrito por funções matemáticas que combinam a rigidez de cada elemento individual e geram uma matriz de rigidez da estrutura que relaciona

as forças e deslocamentos iniciais e calcula valores de deslocamentos, tensões e deformações dentro dos elementos.

### **2.3.1 Idealização de sistemas e modelos discretizados**

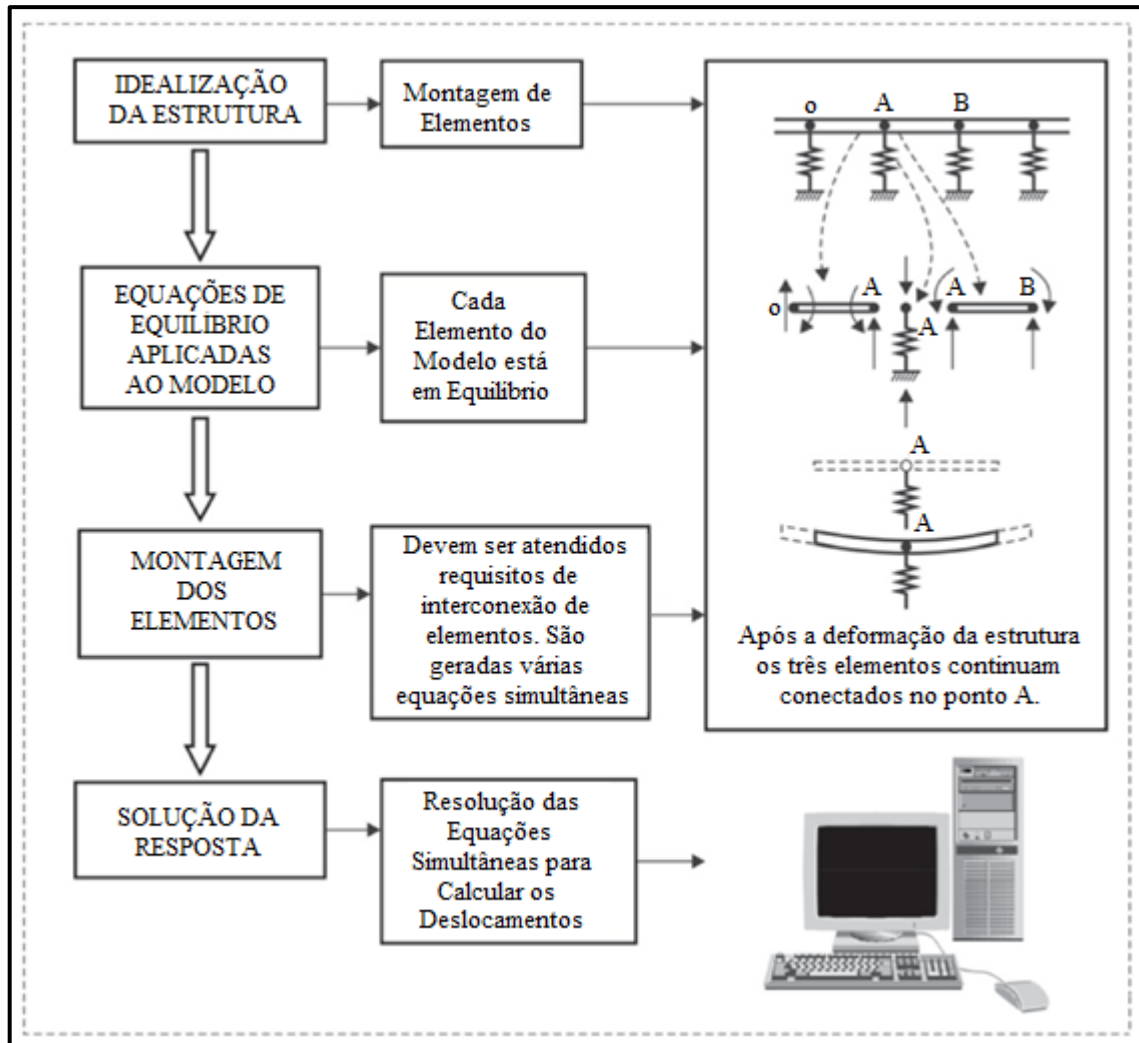
Ao analisar um sistema qualquer, não é possível entender seus fenômenos em uma só operação, sendo natural do ser humano subdividi-lo para compreender melhor o seu comportamento. Sendo assim, é necessário entender o comportamento de cada elemento da estrutura para entender seu comportamento global. Sistemas contínuos são resolvidos de forma analítica por meio de equações diferenciais apoiadas por teorias da mecânica geral e resistência dos materiais que possibilitam a resolução exata de infinitos pontos de um corpo contínuo, compreendendo o comportamento geral do sistema (ALVES FILHO, 2012).

Sistemas discretos são resolvidos pelo MEF e são caracterizados por dividir uma estrutura em partes separadas e distintas. A resolução neste caso, é aproximada e simula o componente da análise em uma montagem de elementos com comprimento finito, representando uma estrutura modelada a partir de um agregado de estruturas mais simples. Os pontos de conexão dessas estruturas simplificadas são chamados de nós. Desta forma, a solução de modelos discretos é calculada a partir de pontos específicos de um corpo contínuo e que representam o comportamento global do mesmo a partir dos deslocamentos individuais dos nós. Essa discretização da estrutura permite o uso simultâneo de diversas equações algébricas, que são geradas e resolvidas com auxílio de processos computacionais onde são abordados no MEF (ALVES FILHO, 2012).

### **2.3.2 Método geral para análise de sistemas discretos**

De acordo com Alves Filho (2012), na análise MEF, inicialmente deve-se idealizar a estrutura por meio da montagem dos elementos que a compõe, representando-os de acordo com a aproximação real do problema. Na sequência são aplicadas ao modelo equações algébricas geradas a partir da condição de equilíbrio de cada elemento descritas por notação matricial. Na próxima etapa ocorre a montagem dos elementos onde devem ser atendidos todos os requisitos de interconexão nodais, gerando várias equações simultâneas. Por fim, a resposta é obtida por métodos computacionais através da resolução das matrizes que compõe o problema, um esquemático desse processo pode ser visualizado na figura 3.

Figura 3 – Método geral para análise de sistemas discretos



Fonte: Alves Filho (2012).

### 2.3.3 Tipo de estrutura

Azevedo (2003) descreve que as estruturas no MEF são classificadas em razão à sua geometria como reticuladas, laminares ou sólidas. A geometria sólida se trata de modo genérico, quando não apresentam nenhuma relação que a defina no grupo das estruturas laminares ou reticuladas.

De acordo com Azevedo (2003), uma estrutura laminar pode ser representada através de uma lâmina com espessura muito inferior ao restante de suas dimensões, este modelo de estrutura é caracterizado como parede, laje ou casca plana. O tipo parede está sujeito à carregamentos paralelos ao seu plano médio enquanto a estrutura tipo laje sofre a ação de forças

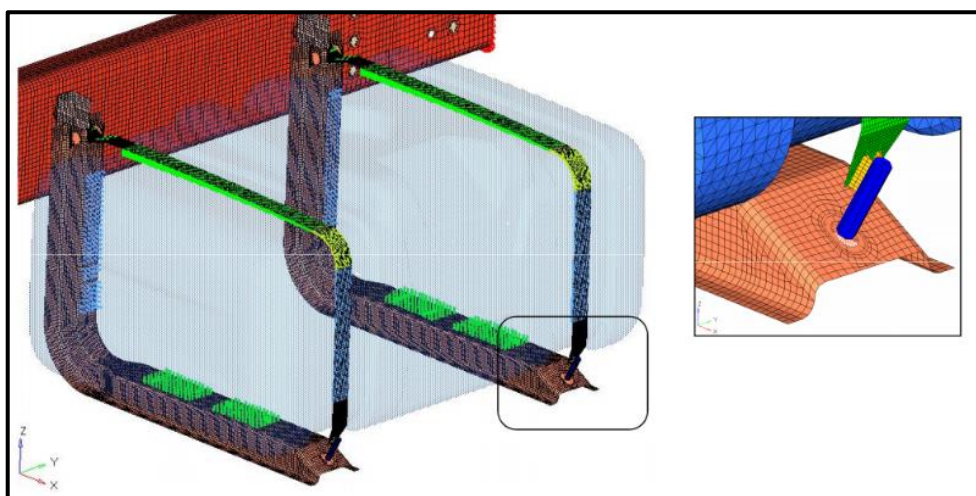
perpendiculares a este plano, além da ação de momentos que estão representados por vetores nesse mesmo plano médio. Por fim, tem-se a estrutura laminar tipo casca plana que é sujeita a outros tipos de carregamentos diferente dos citados acima. Pode-se existir a casca tridimensional, quando a superfície média não é plana.

Azevedo (2003) descreve que a estrutura segundo a geometria reticulada é descrita por barras prismáticas, onde as dimensões transversais dessas barras são muito menores que o seu comprimento, muito bem representada por estruturas do tipo treliça.

Alves Filho (2012) relata que cada elemento composto por uma barra prismática da geometria reticulada é conectado entre si somente nas juntas ou nós estruturais, e é nesses pontos, que ocorrerão a interação das forças do problema.

Na prática temos diversos problemas que não podem ser representados apenas com vigas e treliças. Esses componentes estruturais sofrem características diferentes do ponto de vista de carregamento e geometria como por exemplo um chassi veicular, componentes de uma máquina ou uma barragem. Neste caso o elemento estrutural é representado em forma contínua e subdividido artificialmente em um certo número de elementos finitos, divisão essa que é representada pela chamada malha de elementos finitos. O tamanho e tipo dessa malha de elementos é um parâmetro muito importante no cálculo MEF e depende das propriedades do elemento escolhido (ALVES FILHO, 2012). Na figura 4 pode-se verificar um exemplo de uma malha na análise MEF.

Figura 4 – Malha de elementos finitos de um suporte de tanque de combustível



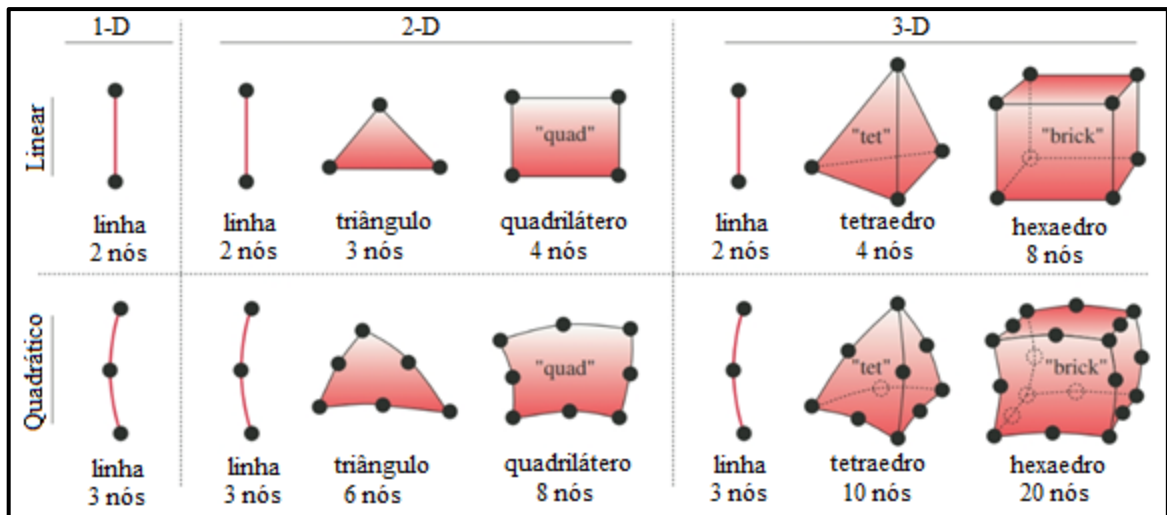
Fonte: Bepo Componentes Automotivos (2018).



### 2.3.4 Tipo de elemento

Norton (2004) explica que os elementos podem ser de uma, duas ou três dimensões e também são caracterizados por sua ordem, geralmente descrita por um polinômio interpolador que calcula os deslocamentos no interior do elemento. A disposição do elemento 1D, 2D ou 3D está relacionado com o número de graus de liberdade que cada nó do elemento possui representadas por barra, superfície e sólido respectivamente. Em geral, estruturas com geometrias complexas em diversas condições de carregamento requerem o uso de elementos tridimensionais, a figura 5 ilustra diversos tipos de elementos.

Figura 5 – Tipos de elementos finitos



Fonte: Norton (2004).

### 2.3.5 Tipos de análise

Segundo Azevedo (2003), o primeiro passo ao analisar uma estrutura via MEF é classificar o componente em estudo segundo sua geometria, modelo de materiais e carregamentos envolvidos. Cada problema é individualizado e modelado segundo as simplificações impostas pelo engenheiro. Na sequência são descritos alguns aspectos quanto à carregamentos que devem ser considerados antes do processo de análise de uma estrutura.

#### 2.3.5.1 Análise linear

Azevedo (2003), aborda que ao analisar-se uma estrutura, é comum considerar os

deslocamentos impostos pelas ações das forças externas pequenos em relação ao tamanho dos componentes dessa estrutura. Dentro desse contexto pode-se desprezar os efeitos da modificação da geometria do componente em estudo em função da distribuição dos esforços e das tensões, admitindo-se uma análise denominada linear.

Alves Filho (2012) explica que estruturas analisadas dinamicamente e estaticamente geralmente são resolvidas através de cálculos lineares, por meio da resolução de sistemas com equações algébricas lineares e equações diferenciais lineares, respectivamente. Nessa análise, os cálculos são simplificados e baseiam-se nos fundamentos da estática e dinâmica analítica, onde considera-se uma proporcionalidade direta entre os efeitos e causas no sistema.

#### 2.3.5.2 Análise não linear

Azevedo (2003) descreve que nem sempre é possível desprezar os efeitos da modificação da geometria e deslocamentos em função da distribuição dos esforços e das tensões impostas no componente, neste caso existem modelos que devem ser analisados sob o ponto de vista não linear.

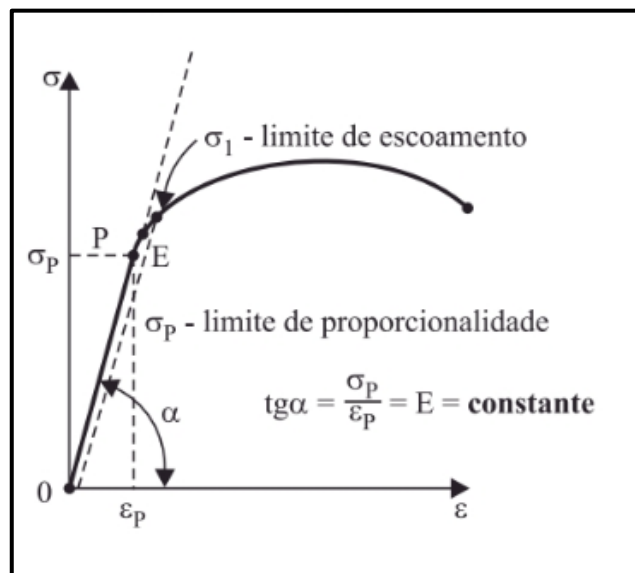
Diversos problemas de análise estrutural tratam os fenômenos de forma linear, entretanto o mundo não se comporta dessa forma e existem casos que as não linearidades devem ser consideradas no problema para garantir resultados confiáveis em termos de custo e segurança. A não linearidade é exemplificada quando a rigidez de um sistema varia ao longo de um carregamento, isso pode ocorrer em função da variação das características, propriedades físicas e geométricas do componente em estudo (ALVES FILHO, 2012).

##### 2.3.5.2.1 Não linearidades associada ao material

Alves Filho (2012) relata que esse tipo de não linearidade está associada às propriedades do material, por exemplo, quando o material se comporta de forma anisotrópica, possuindo diferentes propriedades elásticas de acordo com a sua orientação ou em uma condição que o módulo de elasticidade varie não linearmente de acordo com o carregamento que a estrutura foi submetida. Neste caso o procedimento de cálculo deve atualizar a matriz de rigidez em função do estágio que o carregamento se encontra. Se o cálculo contempla a análise da deformação permanente até a carga final, oferecer somente o módulo de elasticidade (E) durante o regime plástico é insuficiente, sendo necessário descrever o comportamento plástico

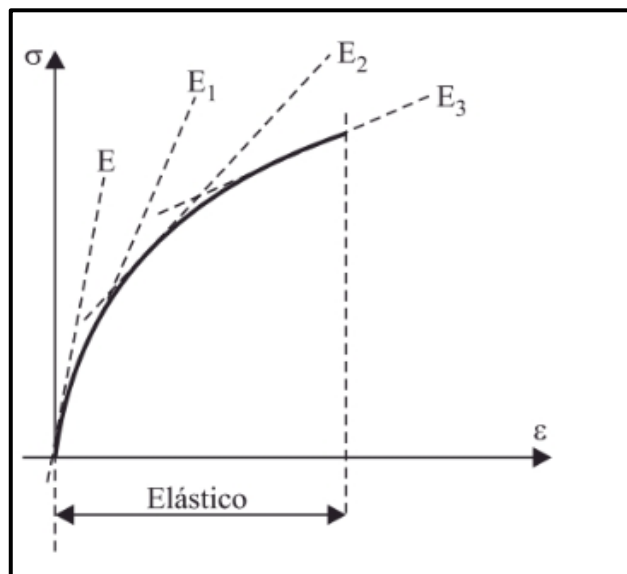
do material através de uma curva tensão-deformação. Neste caso o *solver* irá calcular a parcela de deformação elástica somada a parcela de deformação plástica e atualiza a matriz de rigidez ao longo do carregamento. Nas figuras a seguir são demonstrados diferentes comportamentos de materiais sob carregamento. A figura 6 descreve um comportamento de um aço em que o módulo de elasticidade se mantém constante e neste caso a análise pode ser considerada linear, nas figuras 7 e 8 tem-se diferentes não-linearidades, no primeiro caso devido ao comportamento elástico não linear e no segundo devido a plasticidade do material.

Figura 6 – Diagrama tensão-deformação: comportamento linear



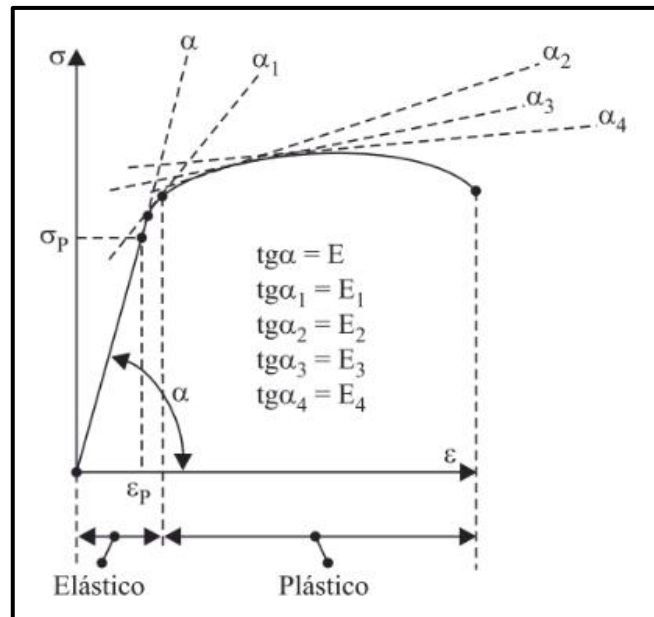
Fonte: Alves Filho (2012).

Figura 7 – Diagrama tensão-deformação: comportamento não linear elástico



Fonte: Alves Filho (2012).

Figura 8 – Diagrama tensão-deformação: comportamento não linear devido a plasticidade



Fonte: Alves Filho (2012).

#### 2.3.5.2.2 Não linearidades associadas a grandes deformações

Alves Filho (2012) descreve que situações onde a variação dimensional de um corpo é grande, essa alteração da propriedade física do elemento se comporta de uma maneira não linear. Dessa forma, essa variação seja no comprimento ou seja na seção transversal, deve ser atualizada ao longo do carregamento no processo de análise.

#### 2.3.5.2.3 Não linearidades associadas a alterações de geometria

As relações entre as forças e deslocamentos de uma estrutura se alteram em grandes deslocamentos. Isso quer dizer que no exemplo de uma viga em flexão, sua rigidez irá variar de uma maneira não linear ao passo que sua flecha aumenta, o qual chama-se de não linearidade geométrica (ALVES FILHO, 2012).

#### 2.3.5.2.4 Não linearidades associadas à mudança das condições de contorno

Alves Filho (2012) cita outro tipo de não linearidade relacionado ao contato, descrevendo que a medida que os deslocamentos ocorrem em uma estrutura, estes podem alterar as condições de contorno iniciais do problema. Essa mudança no contato entre as partes de uma

estrutura altera a rigidez da mesma, o qual a teoria do MEF chama de “GAP”.

#### 2.3.5.3 Análise estática

De acordo com Alves Filho (2012), estruturas solicitadas com carregamentos lentos, geram movimentos suficientemente lentos em que é possível determinar em qualquer instante as deformações e tensões resultantes por intermédio de uma análise estática. Os modelos estáticos de elementos finitos determinam que a condição deformada de uma estrutura depende exclusivamente da sua matriz de rigidez, dentro desse contexto admite-se que as ações das forças externas que atuam sob uma estrutura em deformação são inteiramente absorvidas pelas forças elásticas. Em termos de energia, isso significa que toda a energia concedida à estrutura por meio dos carregamentos externos será transformada em energia de deformação. Na sequência é demonstrada a equação linear geral (2) para o carregamento estático expressa em notação matricial no MEF:

$$\{F\} = [K].\{u\} \quad (2)$$

onde:  $\{F\}$  é a matriz coluna com todas as cargas nodais;

$[K]$  é a matriz quadrada de rigidez da estrutura;

$\{u\}$  é a matriz coluna com todos os deslocamentos nodais.

#### 2.3.5.4 Análise dinâmica

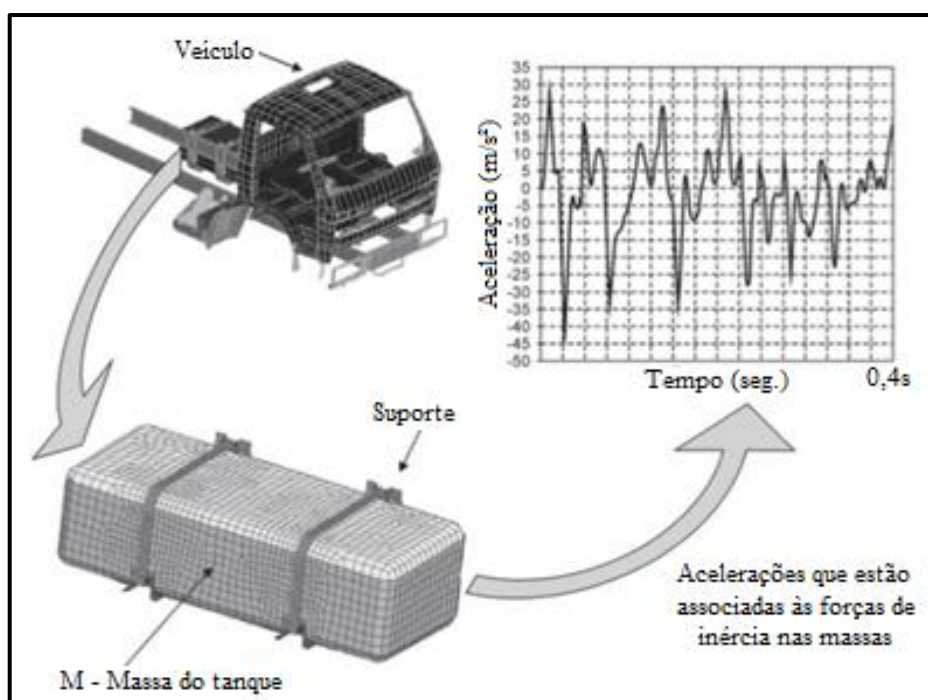
Estruturas reais possuem infinitos graus de liberdade e estão sujeitas a solicitações dinâmicas influenciadas por forças de inércia e forças externas que variam seu carregamento rapidamente em função do tempo, tirando a estrutura do equilíbrio estático. Isso quer dizer que existem mudanças expressivas em termos de velocidade que causam o aparecimento de acelerações que requerem um olhar mais detalhado do ponto de vista estrutural, causando vibração no sistema. Se essa vibração não for controlada pode gerar desde um mero ruído indesejável por conforto, uma ineficiência de um componente mecânico ou até mesmo um desastre catastrófico geralmente ocasionado pelo fenômeno de fadiga devido a ação repetitiva dos carregamentos (ALVES FILHO, 2005).

Segundo Alves Filho (2005), carregamentos dinâmicos podem ser classificados de

diferentes formas, podendo ser cíclicos, senoidais ou não periódicos. Cargas cíclicas ocorrem em intervalos de tempos iguais e se repetem durante sua ação. Em cargas senoidais o carregamento se comporta de forma harmônica (senóide) ao longo do tempo, verifica-se uma grande importância no estudo de estruturas com esse tipo de carregamento. Por fim cita-se o carregamento não periódico que se caracteriza por ocorrer em curtos espaços de tempo representado por cargas de impacto.

Alves Filho (2005) cita o exemplo de um conjunto de um suporte de tanque de combustível, tema abordado neste trabalho. No carregamento dinâmico a massa do tanque suspensa pelo suporte é sujeita a ações de frenagens bruscas, acelerações repentinas, pisos irregulares que causam carregamentos de impacto, reduções acentuadas de marcha, etc. Esses diferentes eventos implicam no surgimento de diferentes acelerações e de variadas intensidades. Na figura 9 é possível perceber as acelerações verticais provenientes de testes de campo representadas graficamente, a massa do tanque e demais componentes do sistema têm forças de naturezas variadas que não poderiam ser determinadas somente com valores máximos de força tradicionalmente estudados em análises estáticas. Nota-se que o problema deve ser estudado em virtude dos diferentes carregamentos ao longo do tempo, além de constatar as características dinâmicas de cada componente individualmente. Verifica-se um real caso que deve ser resolvido do ponto de vista dinâmico.

Figura 9 – Carregamento dinâmico de um conjunto tanque de combustível



Fonte: Alves Filho (2005).

Na sequência pode-se verificar a representação da equação dinâmica geral (3) em termos de matriz utilizada no MEF:

$$[M].\{\ddot{U}\} + [C].\{\dot{U}\} + [K].\{U\} = \{F(t)\} \quad (3)$$

onde:  $[M]$  é a matriz de massa da estrutura;  
 $\{\ddot{U}\}$  é a matriz das acelerações nodais;  
 $[C]$  é a matriz de amortecimento da estrutura;  
 $\{\dot{U}\}$  é a matriz das velocidades nodais;  
 $[K]$  é a matriz de rigidez da estrutura;  
 $\{U\}$  é a matriz dos deslocamentos nodais;  
 $\{F(t)\}$  é a matriz das forças nodais variáveis com o tempo.

#### 2.3.5.4.1 Análise modal

Alves Filho (2005) aborda que a análise modal representa o comportamento dinâmico básico de uma estrutura devido à ação de carregamentos dinâmicos que agem sobre a mesma. A equação (4) representa a equação para a vibração livre não amortecida, utilizada no cálculo dos modos de vibrar e frequências naturais da análise MEF deste trabalho. Neste caso, assume-se que o amortecimento é pequeno e inexistem forças externas na vibração.

$$[M].\{\ddot{U}\} + [K].\{U\} = 0 \quad (4)$$

onde:  $[M]$  é a matriz de massa da estrutura;  
 $\{\ddot{U}\}$  é a matriz das acelerações nodais;  
 $[K]$  é a matriz de rigidez da estrutura;  
 $\{U\}$  é a matriz dos deslocamentos nodais;

## 2.4 POLÍMEROS

Mano e Mendes (1999) descrevem que, quando as moléculas são demasiadamente

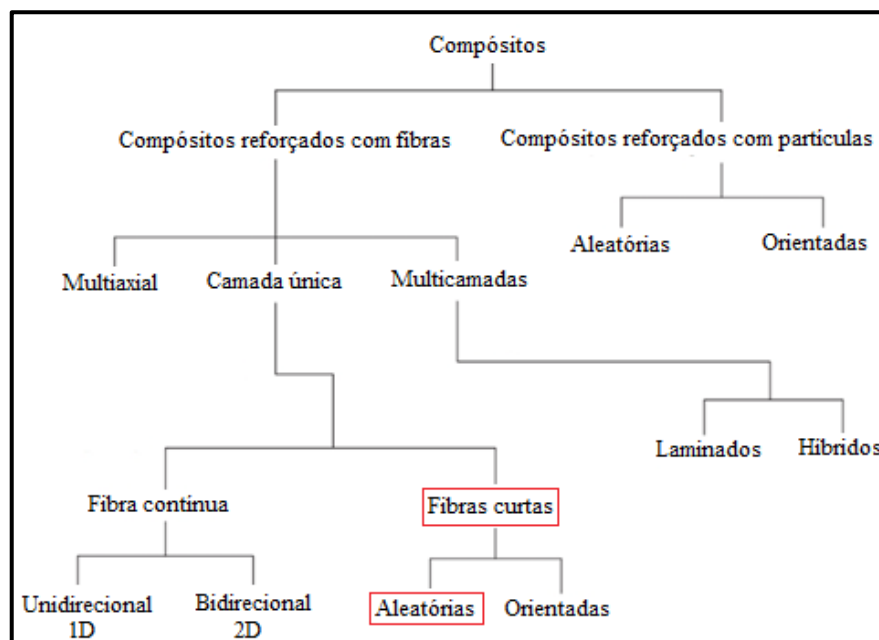
grandes, contendo um número de átomos encadeados superior a uma centena, podem ser chamadas de macromoléculas. Essas cadeias moleculares longas são conectadas por ligações hidrogênicas e interações dipolo-dipolo, ao lado de forças de Van der Waals. Polímeros são caracterizados quanto ao seu tamanho, estrutura química e interações moleculares.

#### 2.4.1 Poliamida

Canevarolo (2002) cita que as poliamidas são termoplásticos comumente chamados de plásticos de engenharia devido suas excelentes propriedades de resistência mecânica e estabilidade dimensional. A alta resistência mecânica desse material ocorre devido às fortes ligações de hidrogênio, por outro lado essa característica de ligação torna o material suscetível à absorção de água (higroscópico). Diante desse fato, a água age como um plastificante para o polímero, diminuindo suas ligações de hidrogênio entre suas moléculas e por consequência, diminuindo rigidez e aumentando seu alongamento. Por ser um termoplástico, a poliamida também sofre influência direta nas propriedades do material sob o efeito da temperatura, com o aumento da mesma o material diminui sua rigidez e aumenta seu alongamento.

Na figura 10 é possível identificar os diferentes compósitos classificados segundo uma hierarquia. A poliamida reforçada com fibra de vidro é utilizada em inúmeras aplicações híbridas e detém de ótimas propriedades mecânicas, combinando rigidez e tenacidade.

Figura 10 – Classificação hierárquica de compósitos sintéticos e naturais

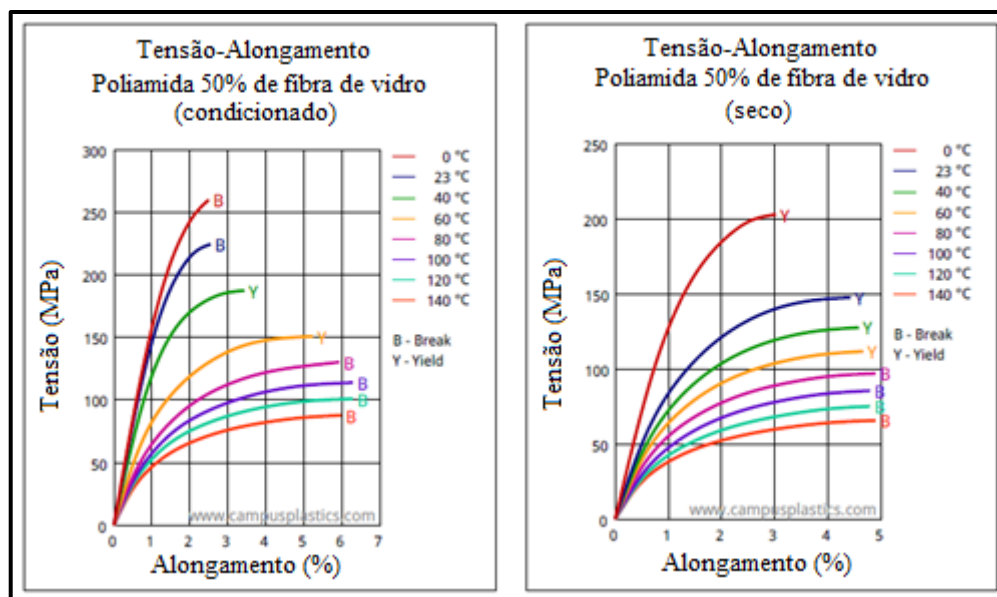


Fonte: Adaptado Neto e Pardini (2016).



Na figura 11 é possível verificar as curvas de tensão-alongamento percentual em função das diferentes temperaturas e condição de trabalho seco ou condicionado para a poliamida reforçada com fibra de vidro. As curvas foram obtidas experimentalmente por meio de ensaio de tração e seguem a norma ISO 527-1:2012.

Figura 11 – Curvas tensão-alongamento para poliamida GF50



Fonte: Campus Plastic (2019).

#### 2.4.2 Compósitos polímeros reforçados com fibra de vidro

Segundo Sathishkumar, Satheeshkumar e Naveen (2014) materiais poliméricos conseguem obter melhores propriedades se combinados a outros materiais, fibra de vidro por exemplo. Polímeros reforçados com fibra de vidro (GFRP) vem sendo usados com sucesso em diversas aplicações na engenharia. O desenvolvimento de novos materiais nesse ramo criou composições adequadas, proporcionando o encontro de propriedades elevadas, maior rigidez que alumínio e massa específica consideravelmente inferior. A propriedade mecânica desse composto está relacionada diretamente com a resistência da fibra, estabilidade química e força de ligação entre a interface fibra/matriz.

Wongpajan *et al.* (2016) relata que nos GFRP a resistência a tração é umas das propriedades mais importantes. Com a incorporação das fibras de alta resistência em uma matriz polimérica pode-se chegar em limites de resistência à tração elevados. A orientação das fibras desses compósitos é um importante fator na resistência do material e é influenciada pelas condições de processamento, geometria do molde e geometria da peça. A propriedade de um

composto híbrido depende do teor, comprimento e extensão das fibras, relação da interface fibra e matriz além da tensão de ruptura das fibras individuais. Na figura 12 está expresso dois diferentes compósitos, na primeira imagem um polímero com fibra longa (unidirecional) e ao lado um polímero com fibra curta (aleatória).

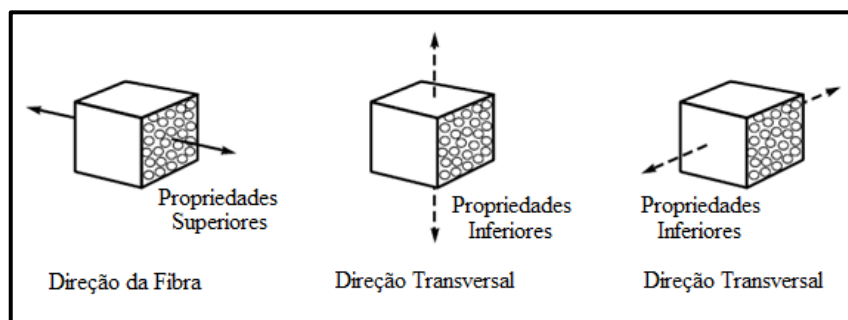
Figura 12 – Grânulos de polímeros reforçados com fibra de vidro



Fonte: Adaptado Catálogo RTP Company (2018).

Canevarolo (2006) cita que a relação entre as deformações específicas normais e tensões normais de um material compósito está relacionada com a orientação em que a força é aplicada, neste caso é necessário definir diferentes módulos de elasticidade nos diferentes eixos representados por  $E_x$ ,  $E_y$  e  $E_z$ , isso acontece devido à ortotropia do material que depende da orientação da fibra dispersa na matriz. A figura 13 representa as diferentes propriedades em função da orientação das fibras.

Figura 13 – Influência das propriedades do compósito GFRP em função da direção dos carregamentos

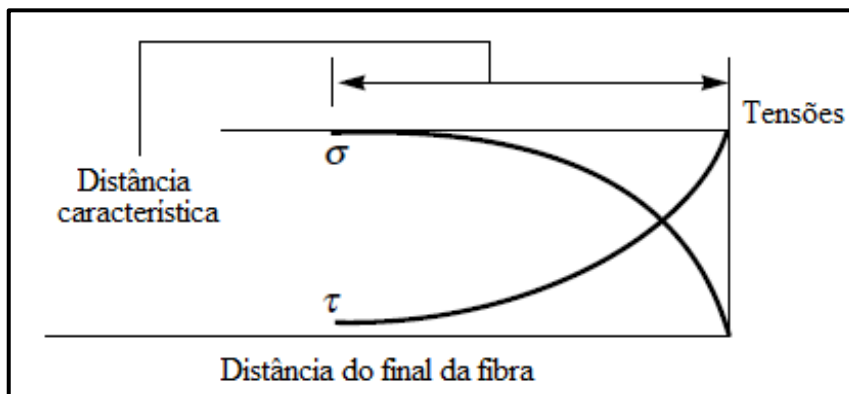


Fonte: Canevarolo (2006).

Hyer (2009) descreve que ao empregar-se o uso de fibras em compósitos é necessário orientar os carregamentos no mesmo sentido da fibra para se obter as melhores propriedades do material. Um carregamento de tração exemplificado na figura 14 demonstra que a matriz transfere a carga para as fibras por meio do cisalhamento, esse estresse na matriz provoca uma carga de tração no interno da fibra, provocando o aparecimento de tensões elevadas de

cisalhamento na superfície externa da fibra e tensões reduzidas de tração no interno da mesma.

Figura 14 – Tensões em um GRFP



Fonte: Hyer (2009).

#### 2.4.2.1 Critérios de falha nos GRFP

Hyer (2009) aborda que a falha em compósitos é devido à ruptura da fibra ou devido à separação da fibra da matriz e ocorre em função de uma combinação de inúmeros mecanismos ou modos, por isso trata-se um assunto complexo e difícil de compreender. Diversos profissionais da área desenvolveram critérios próprios como Máxima Tensão, Máxima Deformação, *Tsai-Hill* e *Tsai-Wu* para avaliarem falha com base em testes experimentais. Entretanto, em meio de inúmeros critérios nenhum pode prever com exatidão todas as condições de carga em todos os compósitos disponíveis. Dessa forma o critério deve ser redutível há um nível que possa fornecer um meio de julgar se um determinado componente estará seguro ou não em função de um determinado valor.

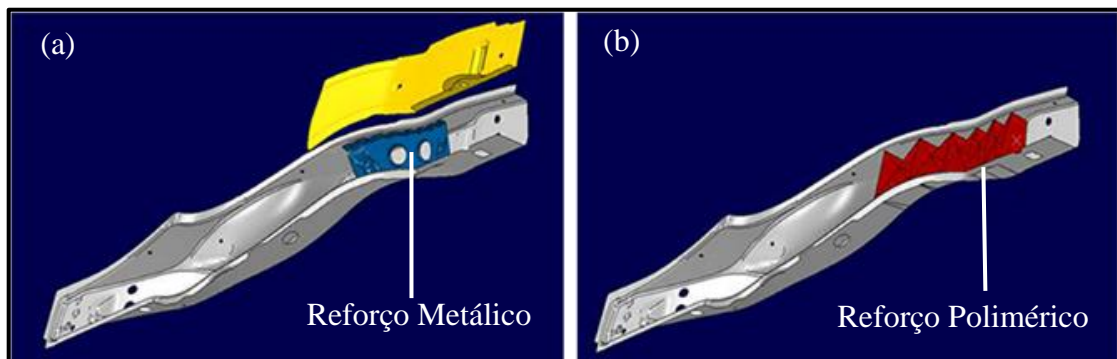
Em uma pesquisa confidencial com dois diferentes fabricantes da área de compósitos poliméricos reforçados com fibra de vidro demonstrou que o critério mais utilizado para a análise estrutural de componentes fabricados a partir de polímeros termoplásticos reforçados com fibra de vidro é o critério de von Mises citado anteriormente. Neste caso assume-se um comportamento dúctil e linear nas diferentes orientações do material afim de simplificar a análise, devido à essa consideração existem fatores de redução das propriedades mecânicas determinados experimentalmente e em função do alinhamento da fibra. Na prática, critérios integrativos como *Tsai-Hill* e *Tsai-Wu* e os outros citados anteriormente aplicam-se em análises envolvendo compósitos laminados, análises térmicas e carregamentos baixos onde os resultados divergem demasiadamente se realizados de forma isotrópica e é necessário a

obtenção de dados extremamente precisos.

## 2.5 ESTRUTURAS HÍBRIDAS DE POLÍMERO E METAL

De acordo com Grujicic (2014), um componente desenvolvido seja qual for sua aplicação no setor automotivo é tipicamente dividido entre o uso de metais e polímeros em termos de aplicações estruturais e não estruturais. Entretanto esse paradigma vem sendo gradualmente modificado com a tecnologia de estruturas híbridas de polímero e metal (PMH), onde polímero e metal são integrados em um único componente, combinando propriedades entre si que não poderiam ser alcançadas se usados de forma isolada. A figura 15 representa um componente estrutural fabricado em aço e ao lado deste mostra-se uma alternativa híbrida metal-polímero.

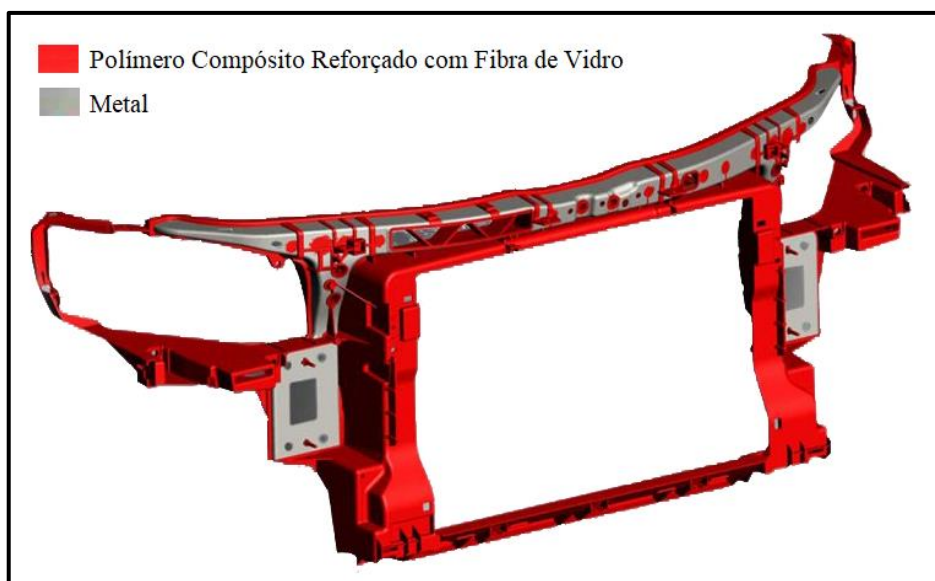
Figura 15 – Exemplo de estrutura automotiva: (a) 100% aço e (b) componente híbrido



Fonte: Fonte: Adaptado Grujicic (2014).

Existem inúmeras vantagens que se pode encontrar com o uso de tecnologias PMH como redução do número de componentes, produção de produtos integrados e prontos para montagem, redução de peso, liberdade de geometrias, melhoria de segurança devido à redução do centro de gravidade do veículo em determinadas aplicações. O primeiro caso envolvendo a tecnologia PHM e relatado publicamente foi implementado pela montadora Audi, em uma estrutura do módulo frontal do veículo A6, um componente semelhante pode ser visualizado na figura 16. Esse componente foi desenvolvido através do processo de moldagem por injeção em um conjunto estrutural composto de chapas metálicas, dispersas em uma matriz polimérica de poliamida. Os testes mecânicos demonstraram que a união dos dois materiais obteve propriedades superiores se analisados individualmente (GRUJICIC, 2014).

Figura 16 – Exemplo de estrutura híbrida presente em um módulo frontal



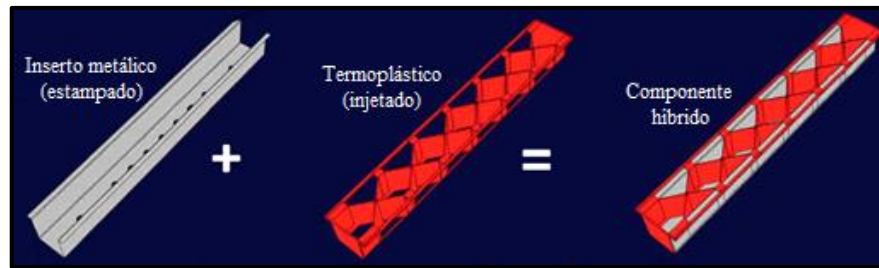
Fonte: Lanxess (2019).

Grujicic (2014) classifica a tecnologia PMH em diferentes formas de fabricação: (a) Tecnologias de moldagem por injeção; b) Tecnologias de sobremoldagem de metais combinadas com operações secundárias de junção; (c) tecnologias de PMH envolvendo colagem adesiva; e (d) tecnologias de PMH de adesão direta. Cada categoria será fundamentada nos capítulos a seguir.

### 2.5.1 Tecnologia PMH com moldagem por injeção

Esse método consiste em produzir insertos metálicos estampados, geralmente em perfil tipo “U”, onde são realizadas furações neste componente. Em seguida, o inserto metálico é posicionado no molde e ocorre a sobre injeção do polímero formando uma estrutura integrada com nervuras cruzadas no material poliamida com 30% de fibra de vidro curta. Neste processo o que garante o intertravamento entre polímero e aço, rigidez e resistência à flambagem do componente será a passagem do polímero através das furações do inserto e a sobremoldagem da matriz polimérica em torno do mesmo formando botões de travamento, um exemplo dessa tecnologia pode ser visualizado na figura 17. No início da tecnologia PMH restrições de ferramental como a abertura da máquina injetora ser unidirecional, proporcionavam o uso de nervuras exclusivamente bidimensionais. Em versões mais recentes pode-se incluir movimentos laterais no ferramental, provendo do uso de nervuras mais resistentes e complexas, com geometrias multidirecionais (GRUJICIC, 2014).

Figura 17 – Tecnologia PMH com moldagem por injeção

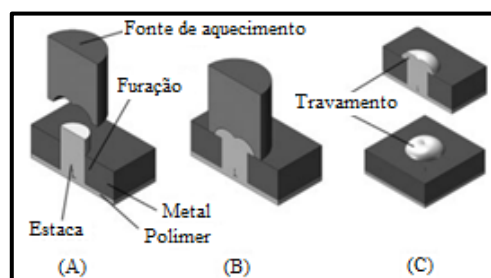


Fonte: Adaptado de Grujicic (2014).

### 2.5.2 Tecnologia PMH com operações secundárias de junção

Essa tecnologia foi desenvolvida e patenteada pela Rhodia e foi empregada inicialmente em um módulo frontal de um caminhão leve de 2004. O processo de fabricação inicia através da estampagem de um aço em perfil tipo “U”, então, este é colocado em um molde de injeção e a sua parte inferior é revestida por uma camada de poliamida fibra curta. Na sequência, uma operação separada de moldagem por injeção também em poliamida produz uma estrutura à parte com nervuras cruzadas, por fim uma operação secundária une o metal revestido e a estrutura de nylon por processo de soldagem ultrassônica. Outra versão de baixo custo desta tecnologia é o chamado processo de montagem de metal-plástico, processo este, também desenvolvido e patenteado pela Rhodia. O método consiste basicamente em três etapas, inicialmente se produz uma peça estampada em perfil tipo “U” com perfurações, em seguida e em um processo distinto fabrica-se um componente em poliamida pelo processo de moldagem por injeção, nesta peça existem estacas térmicas com o objetivo de encaixar nos orifícios do componente metálico e que podem ser visualizadas na figura 18. Na etapa final, ambos componentes se encaixam, as torres presentes na peça polimérica são deformadas e fundidas por meio de processos como ultrassom ou aquecimento por calor, fixando o conjunto (GRUJICIC, 2014).

Figura 18 – Exemplo de processo de junção de estruturas híbridas: *staking*



Fonte: Adaptado de Graz University of Technology

### **2.5.3 Tecnologia PMH com ligação adesiva**

Grujicic (2014) cita que o responsável pelo desenvolvimento dessa tecnologia foi a Dow Automotive e foi introduzida em 2003 por meio de um protótipo para estrutura frontal de um veículo destinado ao grupo Volkswagen. O processo é composto de três etapas, inicialmente uma estrutura nervurada em polipropileno com fibra curta é moldada por injeção e em um segundo processo é feita uma peça metálica estampada. Na sequência de fabricação ambos componentes são submetidos a aplicação de um adesivo superficial de baixa energia (LESA) e colocados em contato por meio de robôs. Por fim tem-se a cura do adesivo. Nesse tipo de tecnologia encaixes são previamente projetados para garantir o alinhamento das peças na fase de cura do adesivo. Uma das grandes vantagens desse processo é que a ligação adesiva entre o meio bimaterial minimiza as concentrações de tensão entre a interface metal e polímero, além de proporcionar a criação de estruturas de seção fechada oferecendo maiores capacidades de carga. Um exemplo dessa aplicação pode ser visualizado na figura 19.

### **2.5.4 Tecnologia PMH com adesão direta**

Esse tipo de tecnologia PMH é recente e visa suprir algumas das limitações das outras três tecnologias citadas anteriormente, dentre essas destacam-se que no processo de sobremoldagem se faz necessário o uso de perfurações no componente metálico para formar os rebites de travamento da estrutura híbrida, no entanto, essas perfurações podem comprometer a integridade estrutural da peça. No processo de sobremoldagem por injeção além do problema citado anteriormente se faz necessário o uso de flanges no componente metálico para ocorrer um intertravamento efetivo entre metal e polímero, entretanto é comum que esses flanges passem por processos de solda ponto e isso não permite que o polímero envolva por inteiro o componente metálico, comprometendo o intertravamento mecânico da peça. No processo PMH com ligação adesiva é necessário o emprego de adesivos especiais de alto custo, tempo de cura relativamente longo e limitações quanto à resistência química e térmica em ambientes agressivos (GRUJICIC, 2014).

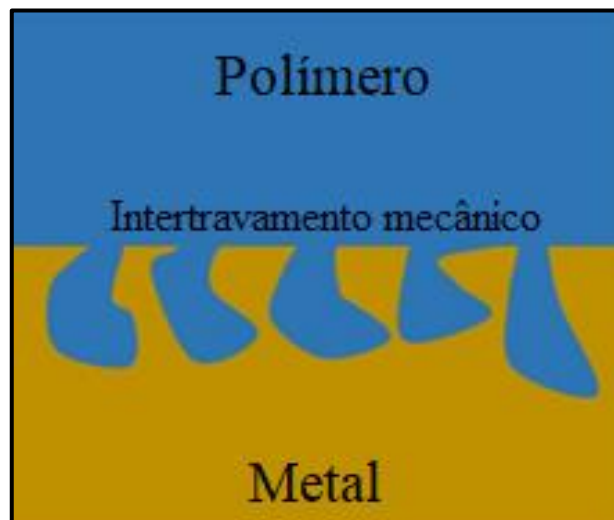
Ainda segundo Grujicic (2014), na tecnologia de PMH de adesão direta a união entre metal e polímero se dá por contato direto sem a necessidade de mecanismos extras como adesivos, flanges ou rebites de intertravamento. Esse tipo de tecnologia com adesão direta aproveita vários fenômenos e processos mecânicos, físicos e químicos para atingir a resistência

de adesão necessária e serão classificados na sequência.

#### 2.5.4.1 Tecnologia PMH com adesão direta por intertravamento mecânico

Grujicic (2014) relata que embora ainda ocorra intertravamento mecânico na adesão metal e polímero, o mecanismo desse processo é distinto dos citados anteriormente, ocorre que a adesão se dá pelas características de rugosidade micrométrica entre metal e plástico fundido e está representada na figura 19. Neste tipo de processo, é de fundamental importância o aquecimento do componente metálico para garantir uma boa adesão entre os diferentes substratos, este aquecimento pode ser feito e efetivamente alcançado pela integração de um aquecedor de indução no molde de injeção.

Figura 19 – Intertravamento mecânico com adesão direta



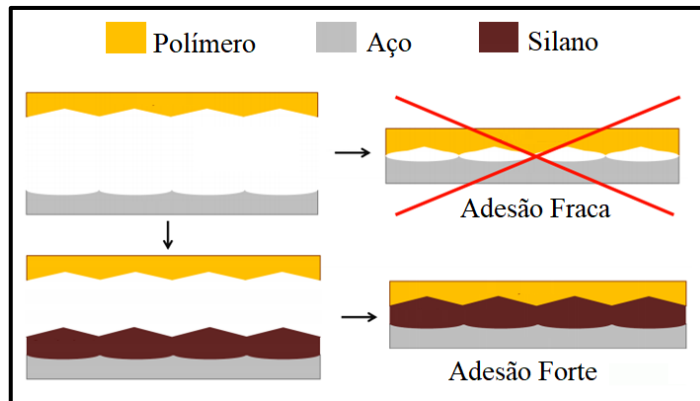
Fonte: Adaptado de Üzümlü (2015).

#### 2.5.4.2 Tecnologia PMH com adesão direta por promotor químico

Esse tipo de adesão ocorre através da aplicação de *primers*. O *primer* mais utilizado neste tipo de aplicação é o denominado silano, que devido às suas características químicas, atua como um agente de acoplamento em materiais inorgânicos (metal) e orgânicos (polímero) neste caso. Para que o silano atue é necessário que suas porções organo-reativas estejam em contato com a interface metal e polímero, isso é obtido revestindo o substrato metálico imediatamente antes do processo de moldagem por injeção. Na figura 20 é possível verificar o conceito dessa tecnologia (GRUJICIC, 2014).



Figura 20 – Tecnologia com o uso de primer silano com adesão direta



Fonte: Adaptado Grupo Sim (2013).

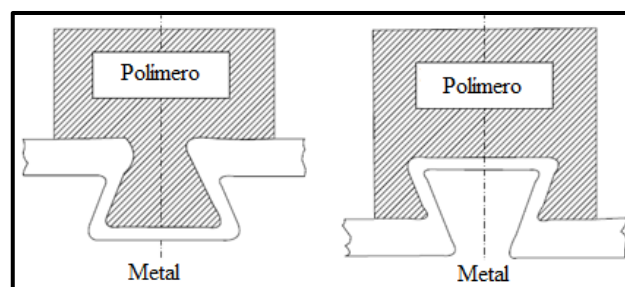
#### 2.5.4.3 Tecnologia PMH com adesão direta por modificação química

Grujicic (2014) aborda que diversos estudos têm sido relatados sobre a modificação de materiais termoplásticos polimerizados por meio da mistura de diferentes polímeros ou na mudança direta de seus monômeros. Essas modificações químicas podem influenciar intensamente sobre as forças de adesão entre os substratos polimérico e metálico.

#### 2.5.4.4 Tecnologia PMH com adesão direta *clinch-lock*

Essa tecnologia utiliza de algumas idéias do processo de união mecânica de chapas denominado *clinch*. Por meio da modificação da geometria do componente metálico, entalhes e impressões em formas de pontos rasos e de grandeza milimétrica são produzidos por estampagem. Essas impressões garantem a ancoragem do elemento polimérico ao metal devido o intertravamento mecânico e a maximização da área de contato entre metal e polímero (GRUJICIC, 2014).

Figura 21 – Esquemático de dois conceitos da tecnologia *clinch-lock* com adesão direta

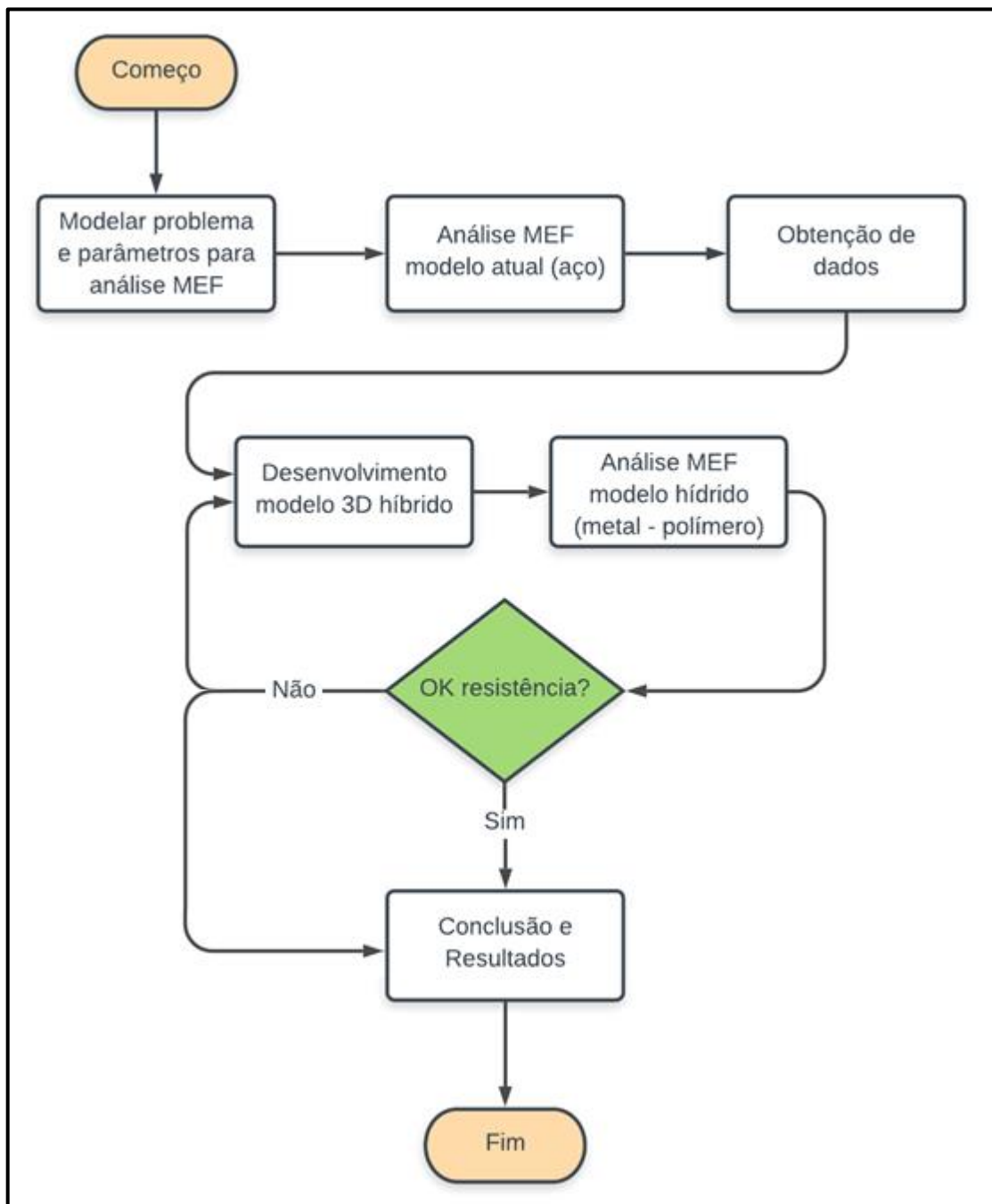


Fonte: Grujicic (2008)

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo foi relatada a metodologia e estratégia de trabalho tomadas para realizar as atividades da segunda parte prevista para o trabalho de conclusão de curso. Para facilitar o entendimento, na figura 22 pode-se observar um fluxograma especificando os processos envolvidos ao longo do desenvolvimento do trabalho.

Figura 22 – Fluxograma de fases e entregas principais

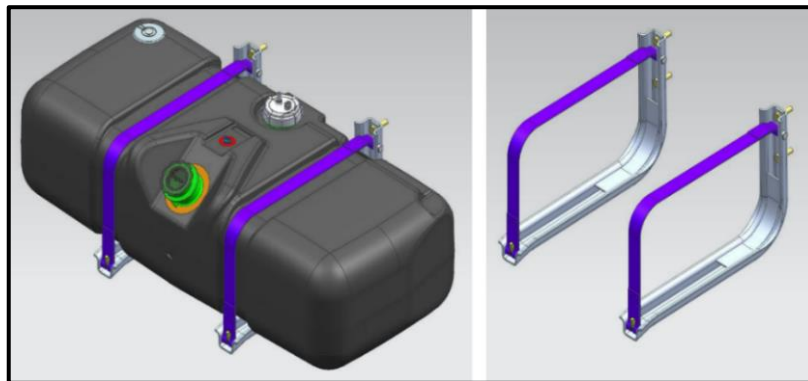


Fonte: O Autor (2018).

### 3.1 ANÁLISE MEF DO SUPORTE EM AÇO

A análise do componente atual em aço foi feita em duas etapas via *software* ANSYS versão 19.0. Inicialmente, o elemento foi analisado estaticamente e após o mesmo passou por uma análise dinâmica modal.

Figura 23 – Montagem conjunto e suporte de tanque metálico

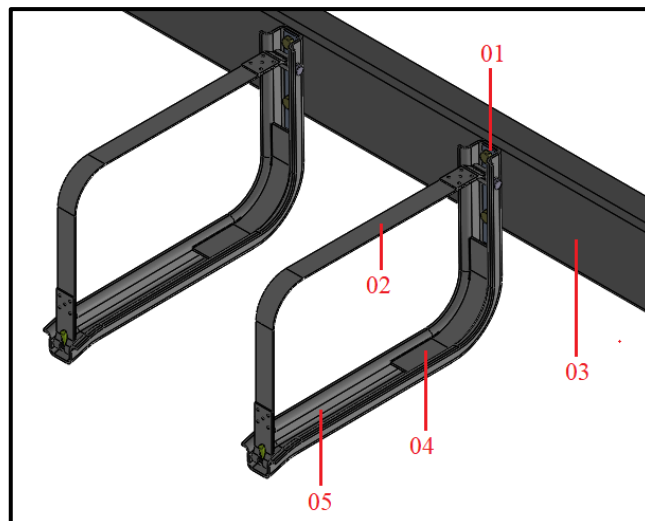


Fonte: Bepo Componentes Automotivos (2018).

#### 3.1.1 Análise estática do suporte em aço

Na etapa de pré-processamento, inicialmente foram obtidas as propriedades mecânicas do componente de estudo. A figura 24 juntamente com a tabela 1 descrevem as propriedades dos diferentes materiais utilizados no projeto.

Figura 24 – Conjunto suporte metálico



Fonte: Bepo Componentes Automotivos (2019).

Tabela 1 – Propriedades mecânicas do suporte metálico

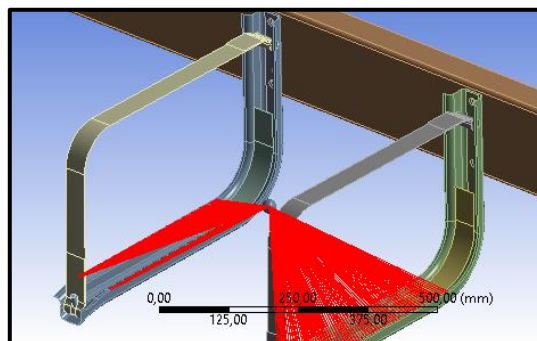
Componente	Material	Norma	Espessura	Módulo de elasticidade ( $E$ )	Coefficiente de Poisson ( $\nu$ )	Limite de escoamento ( $\sigma_e$ )
Reforço fixação do suporte (01)	LNE380	NBR6656	4,25 mm	200 GPa	0,30	380 MPa
Cinta (02)	LNE380	NBR6656	2,65 mm	200 GPa	0,30	380 MPa
Chassi (03)	LNE500	NBR6656	5,00 mm	200 GPa	0,30	500 MPa
Reforço fixação interno (04)	SAE 1008	NBR11888	4,25 mm	200 GPa	0,30	285 MPa
Leito do tanque (05)	LNE280	NBR6656	4,75 mm	200 GPa	0,30	280 MPa

Fonte: Bepo Componentes Automotivos (2019).

Os contatos do modelo foram definidos manualmente, as regiões dos cordões de solda que fixam os reforços ao leito foram aproximadas através do recurso *bonded*. Afim de simplificações e otimização do modelo, o tanque e o combustível diesel (condição cheio) foram idealizados através de um ponto de massa localizado em seu centróide, distribuídos na região de apoio dos suportes. Neste caso, vale salientar que os efeitos da movimentação do líquido no interno do tanque são desprezados. Essa idealização é representada na figura 25 e agrega informações puramente inerciais ao modelo, isso é considerado uma vez que o tanque deforma-se facilmente e agrega baixa rigidez à estrutura.

Na análise estática esse ponto descreve as propriedades de massa do tanque cheio distribuída sobre a região de assentamento dos suportes. As informações dos momentos de inércia do tanque também foram agregadas e extraídas do modelo 3D.

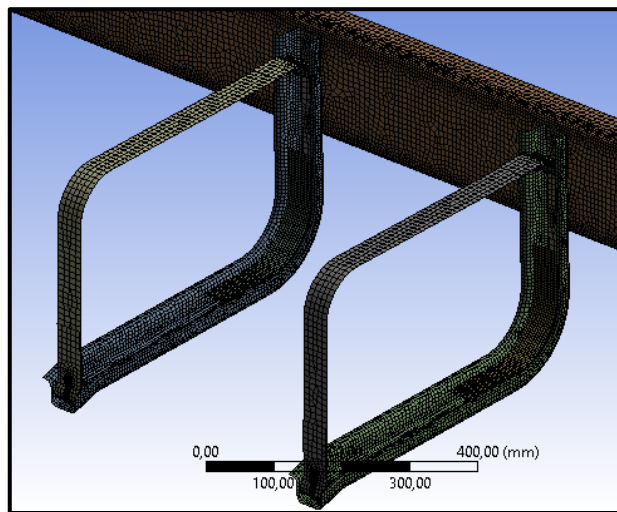
Figura 25 – Idealização do tanque de combustível



Fonte: O Autor (2019).

Para a geração da malha, inicialmente foi necessário realizar simplificações e refinamentos no modelo 3D. A maior parte dos componentes foi modelada através de elementos tipo casca com elementos quadrangulares, com exceção dos pinos e parafuso de fixação que utilizaram elementos tipo sólido tetraédricos. No final obteve-se a malha que pode ser visualizada na figura 26 composta por 59.184 nós e 46.325 elementos.

Figura 26 – Malha do suporte metálico



Fonte: O Autor (2019).

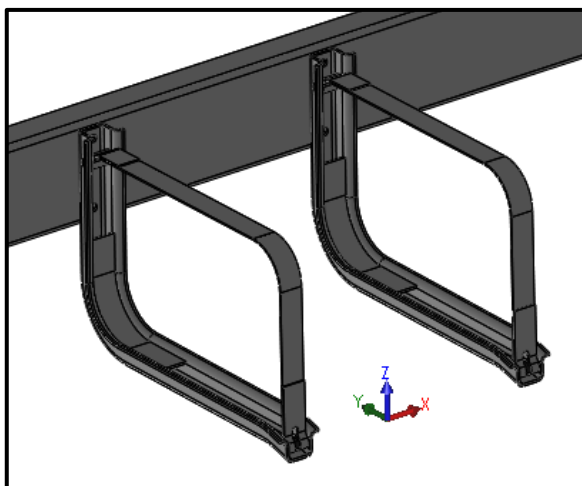
Os carregamentos aplicados na análise estática foram estabelecidos em quatro situações diferentes. No centróide de massa do conjunto (condição tanque cheio) foram impostas cargas majoritárias por meio de acelerações de diferentes magnitudes e orientação. Esses casos de carregamento são típicos para resultados encontrados em um chassi veicular e são baseados em estudos realizados no passado pela empresa. A tabela 2 exemplifica esses valores e a figura 27 os eixos das coordenadas dessas acelerações.

Tabela 2 – Casos de carregamento estático

Caso de carregamento	Aceleração em X (longitudinal)	Aceleração em Y (lateral)	Aceleração em Z (vertical)
1	+3,5G	0G	-1,0G
2	0G	+3,5G	-1,0G
3	0G	0G	+2,5G
4	0G	0G	-3,5G

Fonte: Bepo Componentes Automotivos (2019).

Figura 27 – Eixos de coordenadas



Fonte: O Autor (2018).

### 3.1.2 Análise modal: suporte em aço

Na análise modal do suporte em aço foi encontrado o modo de vibração que representa o movimento vertical (eixo z) dos suportes vibrando independentemente entre si, esta condição é a que mais aparece na aplicação real.

As condições de contorno do modelo foram as mesmas utilizadas na análise estática, porém, nesta análise, o componente não sofreu a imposição de acelerações. Outra particularidade nessa análise, é que o modelo do tanque representado por um ponto de massa foi avaliado em três condições específicas e que idealizam os diferentes níveis de combustível demonstrados na figura 28. As propriedades de inércia foram adquiridas através do software CAD considerando a massa do tanque polimérico e do combustível diesel, e estão representadas na tabela 3.

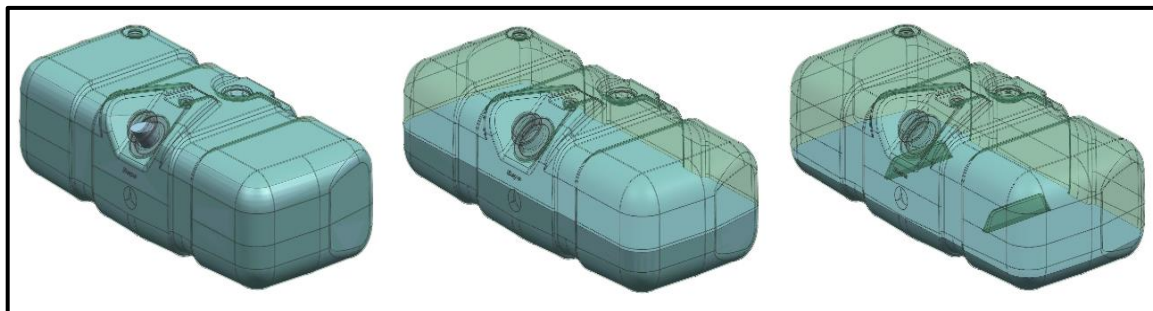
Tabela 3 – Propriedades de inércia do tanque e diesel para o suporte de aço

Análise Modal	Nível de combustível no tanque	(Massa) <sup>1</sup>	(Propriedades de inércia) <sup>1</sup>		
			Ix	Iy	Iz
1	Cheio (175L)	156 kg	4,54.10 <sup>6</sup> kg.mm <sup>2</sup>	1,90.10 <sup>7</sup> kg.mm <sup>2</sup>	2,11.10 <sup>7</sup> kg.mm <sup>2</sup>
2	Médio (80L)	76 kg	1,92.10 <sup>6</sup> kg.mm <sup>2</sup>	8,74.10 <sup>6</sup> kg.mm <sup>2</sup>	1,01.10 <sup>7</sup> kg.mm <sup>2</sup>
3	Vazio (32L)	35 kg	9,72.10 <sup>5</sup> kg.mm <sup>2</sup>	3,94.10 <sup>6</sup> kg.mm <sup>2</sup>	4,48.10 <sup>6</sup> kg.mm <sup>2</sup>

Fonte: Autor (2019)

(1) Propriedades considerando a massa do tanque e do diesel.

Figura 28 – Diferentes níveis de combustível

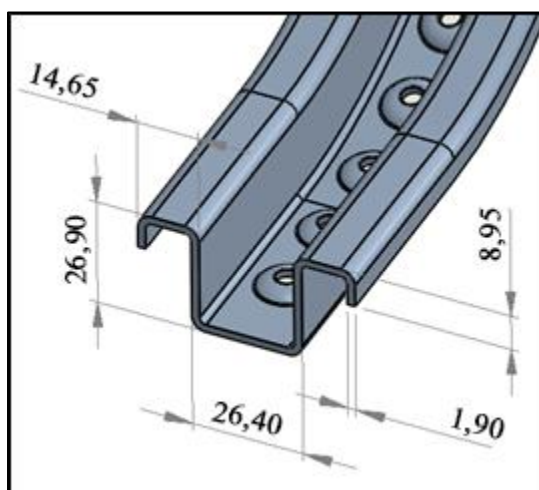


Fonte: Bepo Componentes Automotivos (2019).

### 3.2 DESENVOLVIMENTO DO MODELO 3D HÍBRIDO ALMA CURTA

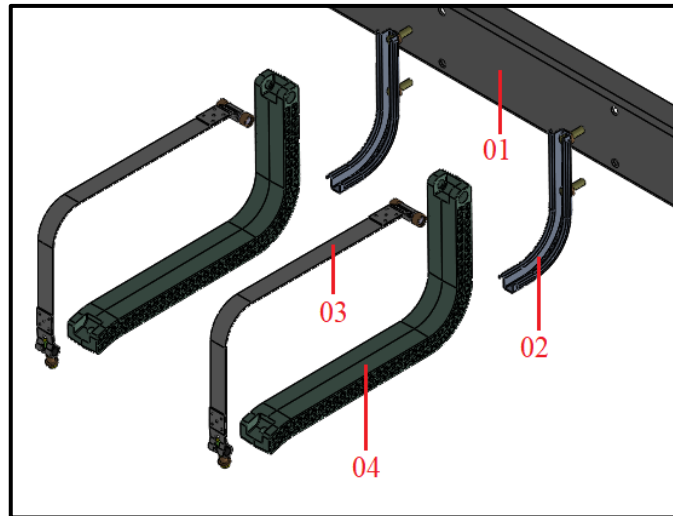
O desenvolvimento do modelo 3D do suporte híbrido foi realizado através do *software* NX Siemens. Inicialmente definiu-se um dimensional, geometria, material e espessura da alma metálica que pode ser visualizada na figura 29 com as medidas expressas em mm. No componente também podem ser identificadas a inclusão de abas laterais, gerando uma seção do tipo ômega e que se comparada proporcionalmente à geometria do suporte de aço eleva o momento de inércia. Na alma foram feitas reentrâncias e furações que seguem o conceito da metodologia *clinch-lock* abordada anteriormente, isso garantirá uma maior adesão entre o polímero e a alma metálica. A alma metálica também foi projetada para receber os parafusos M14 e batentes mecânicos que serão fixados por soldagem, esse conceito de montagem garantirá uma fixação mais segura e robusta ao chassi do veículo. Nas figuras 30 e 31, juntamente com a tabela 4 pode-se verificar a relação dos principais materiais e componentes do projeto híbrido alma curta.

Figura 29 – Detalhamento da seção da alma metálica



Fonte: O Autor (2019).

Figura 30 – Componentes do suporte híbrido



Fonte: Bepo Componentes Automotivo (2019).

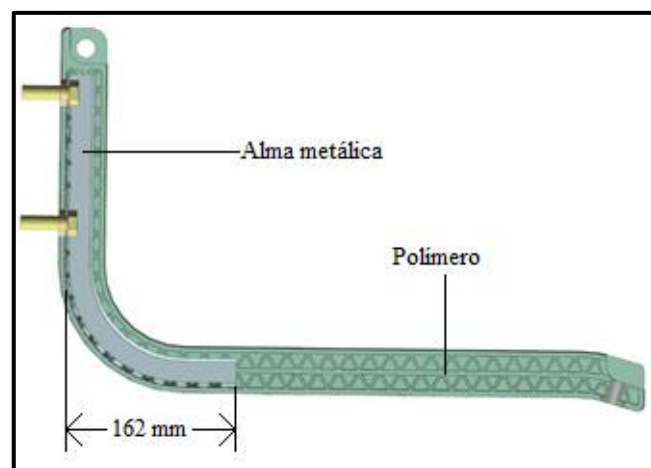
Tabela 4 – Propriedades mecânicas do suporte híbrido alma curta

Componente	Material	Norma	Espessura	Módulo de elasticidade ( $E$ )	Coefficiente de Poisson ( $\nu$ )	Limite de escoamento ( $\sigma_e$ )
Chassi (01)	LNE500	NBR6656	5,00 mm	200 GPa	0,30	500 MPa
Alma de reforço (02)	EM	NBR5906	1,90 mm	200 GPa	0,30	280 MPa
Cinta (03)	LNE380	NBR6656	2,65 mm	200 GPa	0,30	380 MPa
Suporte (04)	PA6 GF50	-	4,25 mm	Variável	0,35	(52,23 MPa) <sup>1</sup>

Fonte: Bepo Componentes Automotivos

(1) Propriedades definidas em condição severa, material condicionado e a uma temperatura de 60°C.

Figura 31 – Detalhamento da alma curta

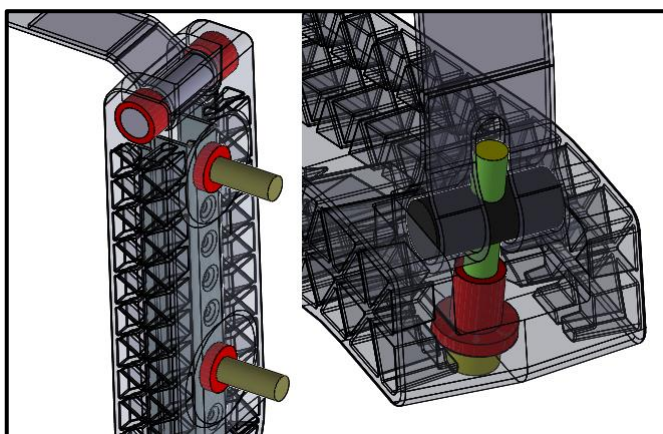


Fonte: O Autor (2019).



Na parte polimérica do suporte foram adicionados insertos nas regiões de fixação e torque da cinta para aumentar sua resistência e não sobrecarregar o polímero. Esses componentes insertados podem ser visualizados na figura 32 através dos componentes destacados em vermelho.

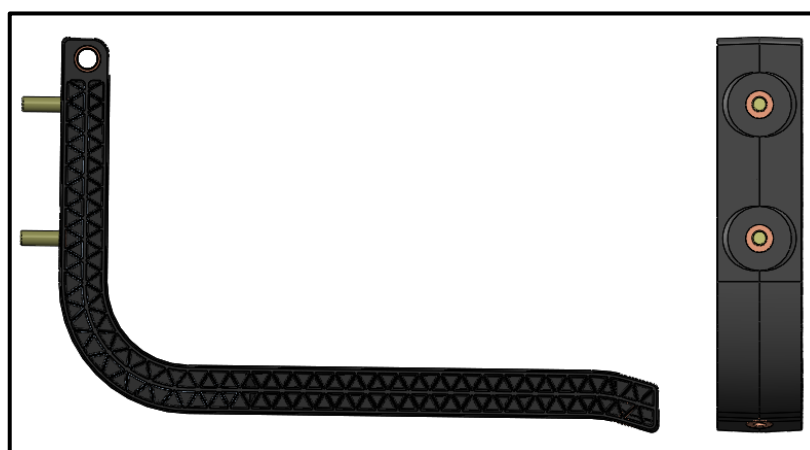
Figura 32 – Detalhamento dos insertos suporte híbrido



Fonte: O Autor (2019).

Ainda na parte polimérica do suporte foram feitas nervuras em x na direção transversal do suporte, agindo como reforço e reduzindo massa, a figura 33 demonstra a maneira que foram projetadas.

Figura 33 – Vista lateral suporte híbrido



Fonte: O Autor (2019).

### 3.3 DESENVOLVIMENTO MODELO 3D HÍBRIDO ALMA LONGA

Na segunda versão do suporte híbrido todas os componentes foram preservados com

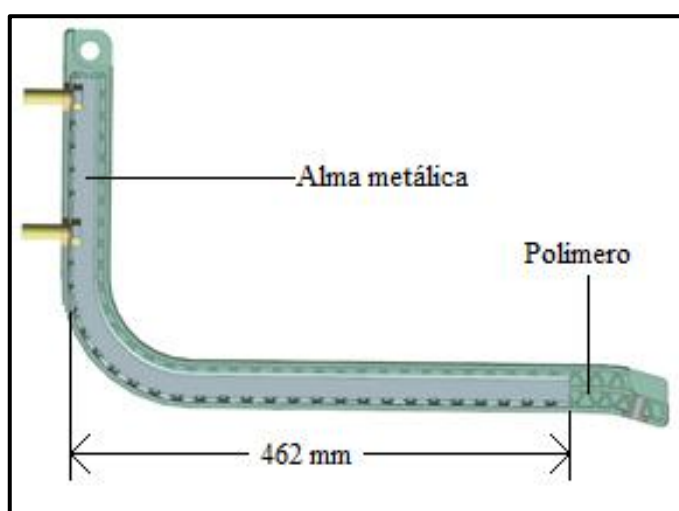
exceção da alma que foi alongada 300mm, podendo ser visualizada na figura 34. A espessura do componente também foi aumentada para 2,65 mm prevendo o uso de um aço LNE380, afim de aumentar a rigidez do conjunto e elevar suas propriedades mecânicas que podem ser visualizadas na tabela 5. A versão alma longa I considera o uso da tecnologia de adesão *clinch-lock*. A versão alma longa II não possui as furações na alma metálica e considera a adesão entre os substratos através do uso de um primer.

Tabela 5 – Propriedades mecânicas da alma longa metálica

Componente	Material	Norma	Espessura	Módulo de elasticidade ( $E$ )	Coefficiente de Poisson ( $\nu$ )	Limite de escoamento ( $\sigma_e$ )
Alma metálica longa	LNE380	NBR6656	2,65 mm	200 GPa	0,30	380 MPa

Fonte: Bepo Componentes Automotivos (2019).

Figura 34 – Suporte híbrido com alma longa



Fonte: O Autor (2019).

Na tabela 6 pode-se verificar um comparativo das massas obtidas nos diferentes conceitos de projeto.

Tabela 6 – Massas obtidas nos diferentes projetos

Suporte de aço (versão atual)	Suporte híbrido alma curta	Suporte híbrido alma longa I	Suporte híbrido alma longa II
5,04 kg	4,34 kg	5,08 kg	5,33 kg

Fonte: O Autor (2019).

### 3.4 ANÁLISE MEF SUPORTE HÍBRIDO ALMA CURTA

A análise do suporte híbrido também foi feita em duas etapas via *software* ANSYS, inicialmente o elemento foi analisado estaticamente e após o mesmo passou por uma análise dinâmica modal.

#### 3.4.1 Análise estática do suporte híbrido alma curta

Na análise da alma metálica, o modelo de material é considerado linear e assume um módulo de elasticidade constante ao longo de todo o carregamento.

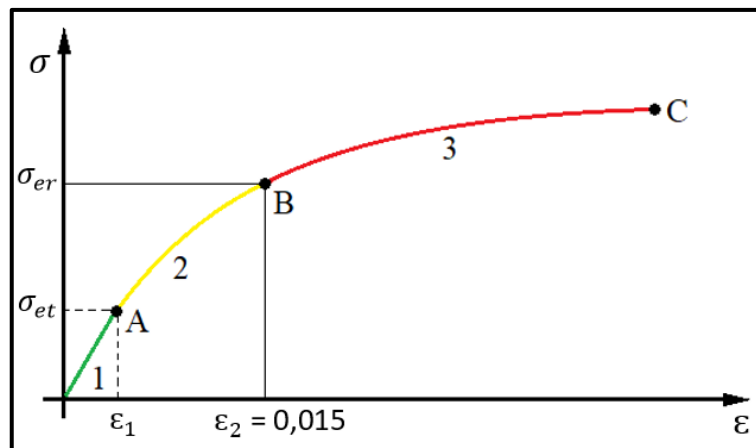
Na análise do compósito, o material não leva em consideração sua anisotropia devido a orientação da fibra na matriz polimérica. Para considerar o comportamento de material isotrópico, a curva de material obtida a partir do fornecedor possui um fator de redução nas propriedades mecânicas, que utiliza um método confidencial e determinado de forma empírica para realizar essa simplificação.

O modelo de material utilizado no ANSYS para descrever o comportamento elástico não linear do polímero foi descrito pela função *Multilinear Isotropic Hardening* e baseia-se na teoria da plasticidade de von Mises, atualizando a matriz de rigidez durante o processo de *solver*, calculando a parcela de deformação elástica e plástica na deformação final.

A figura 35 exemplifica o comportamento do material, no início da deformação, a região linear elástica é descrita pela lei de Hooke e mantém um módulo de elasticidade constante (região 1). Com o aumento da carga e após o limite de proporcionalidade o comportamento é elástico não linear (região 2). Neste caso, é necessário aproximar uma função de material padrão que atualize as variações do módulo de elasticidade ao longo do carregamento. A região 3 representa o real escoamento até o ponto C (ruptura).

O *software* interpreta que o escoamento ocorre no ponto A, no início da curva de plasticidade, entretanto, devido ao comportamento elástico não linear esse limite ocorre mais tarde. Ao contrário dos metais é difícil definir com exatidão o limite de escoamento para plásticos, devido a essa circunstância toma-se como boas práticas de outros projetos passados do fornecedor um limite de escoamento real à 1,5% de deformação e representa um valor de 52,23 MPa. Esse critério para a escolha da tensão de escoamento baseia-se nas características do material condicionado, com um percentual de fibra de 50% e na temperatura de 60°C.

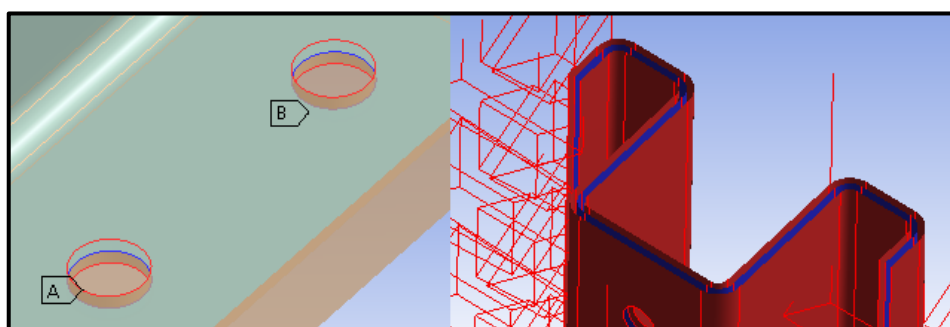
Figura 35 – Comportamento não linear elástico do polímero



Fonte: O Autor (2019).

Os contatos foram definidos manualmente e são todos lineares. Na interface entre polímero e metal, o modelo é tratado como uma montagem e o parâmetro de contato utilizado baseou-se nas forças de adesão entre ambos substratos. Nas regiões onde formam-se os botões de polímero através das furações da alma metálica estipulou-se um contato do tipo colado, nas demais regiões o contato é definido como sem separação, neste segundo caso assume-se pequenos deslocamentos entre as superfícies. A figura 36 demonstra essa idealização aplicada ao modelo, a geometria em azul representa a alma metálica e a geometria em vermelho representa o suporte em polímero.

Figura 36 – Parâmetro de contato entre metal e polímero

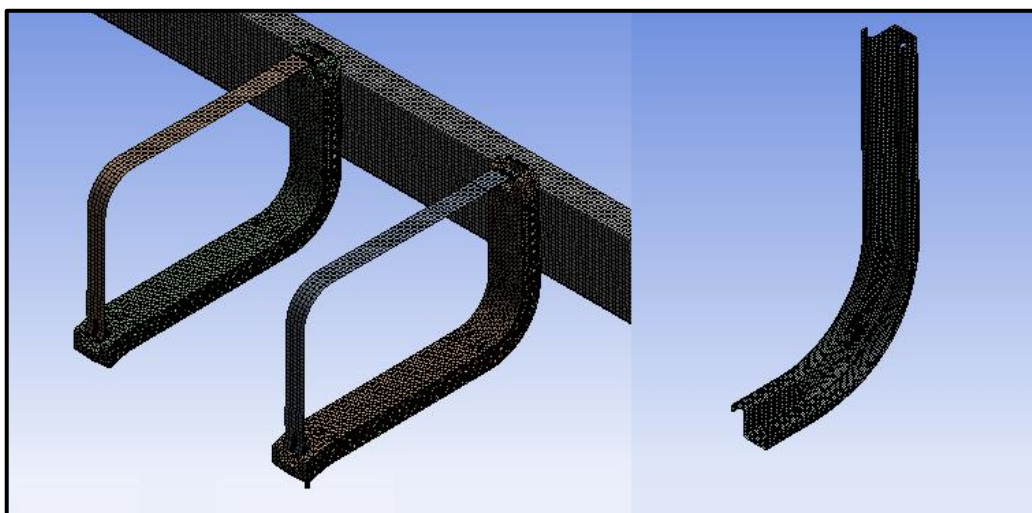


Fonte: O Autor (2019).

Para a geração da malha, inicialmente foi necessário trabalhar a geometria do modelo 3D. Os microestampos da furação da alma, raios e superfícies demasiadamente pequenas foram removidas afim de obter-se uma malha mais controlada e com menos elementos. A alma metálica e cinta foram modeladas com elementos do tipo casca quadrangulares, os demais

componentes foram modelados com elementos do tipo sólido tetraédrico. A mesma passou por refinamentos e no final obteve-se a malha que pode ser visualizada na figura 37 composta por 363.305 nós e 237.234 elementos.

Figura 37 – Malha suporte híbrido alma curta



Fonte: O Autor (2019).

O tanque de combustível foi idealizado da mesma maneira que na análise do suporte de aço, com um ponto de massa em seu centróide distribuído sobre a região de apoio dos suportes. No caso do suporte híbrido o conjunto foi deslocado 75mm para cima, com o objetivo de evitar uma interferência entre o embuchamento do pino superior e a alma metálica. Essa alteração implicou em um novo centro de massa e propriedades de inércia do tanque. Os carregamentos na análise estática também foram os mesmos utilizados na análise do suporte metálico e podem ser visualizados na tabela 8.

### 3.4.2 Análise modal do suporte híbrido alma curta

Assim como na análise modal do suporte em aço, o modo de vibração de interesse foi o movimento vertical (eixo z) dos suportes vibrando independentemente entre si. As condições de contorno do modelo foram as mesmas utilizadas na análise estática, porém, nesta análise, o componente não sofreu a imposição de acelerações. Outra particularidade nessa análise é que o modelo do tanque representado por um ponto de massa foi avaliado em três condições específicas e que idealizam os diferentes níveis de combustível demonstrados na imagem 25. As propriedades de inércia foram adquiridas através do software CAD considerando a massa do

tanque polimérico e do diesel. A tabela 7 representa cada situação da análise.

Tabela 7 – Propriedades de inércia do tanque e diesel para o suporte híbrido

Análise Modal	Nível de combustível no tanque	(Massa) <sup>1</sup>	(Propriedades de inércia) <sup>1</sup>		
			I <sub>x</sub>	I <sub>y</sub>	I <sub>z</sub>
1	Cheio (175L)	156 kg	4,51.10 <sup>6</sup> kg.mm <sup>2</sup>	1,89.10 <sup>7</sup> kg.mm <sup>2</sup>	2,10.10 <sup>7</sup> kg.mm <sup>2</sup>
2	Médio (80L)	76 kg	1,91.10 <sup>6</sup> kg.mm <sup>2</sup>	8,72.10 <sup>6</sup> kg.mm <sup>2</sup>	1,00.10 <sup>7</sup> kg.mm <sup>2</sup>
3	Vazio (32L)	35 kg	9,62.10 <sup>5</sup> kg.mm <sup>2</sup>	3,92.10 <sup>6</sup> kg.mm <sup>2</sup>	4,45.10 <sup>6</sup> kg.mm <sup>2</sup>

Fonte: O Autor (2019).

(1) Propriedades considerando a massa do tanque e do diesel.

### 3.5 ANÁLISE MEF SUPORTE HÍBRIDO ALMA LONGA I

Na análise de elementos finitos do suporte híbrido com alma longa, todos os parâmetros e condições de contorno foram mantidos como no modelo com alma curta. A malha manteve a mesma métrica, porém houve um acréscimo no número de elementos em função do aumento da complexidade geométrica, totalizando uma malha com 512.209 nós e 338.150 elementos.

### 3.6 ANÁLISE MEF SUPORTE HÍBRIDO ALMA LONGA II

Na segunda análise MEF do suporte híbrido com alma longa, todos os parâmetros e condições de contorno foram mantidos igualmente da primeira análise. Porém, o parâmetro de contato considerado entre metal e polímero é diferente em virtude das novas características do projeto. Nesta análise, foram removidas as furações da alma metálica provenientes da tecnologia *clinch-lock* com o objetivo de reduzir os concentradores de tensão e a perda de rigidez do suporte. A adesão entre ambos substratos se dá através do uso de um primer de silano que aumenta as forças de contato. Para essa situação, o contato foi definido como *bonded*. A malha do modelo foi composta com 353.294 nós e 227.348 elementos.

## 4 RESULTADOS

### 4.1 ANÁLISE MEF SUPORTE DE AÇO

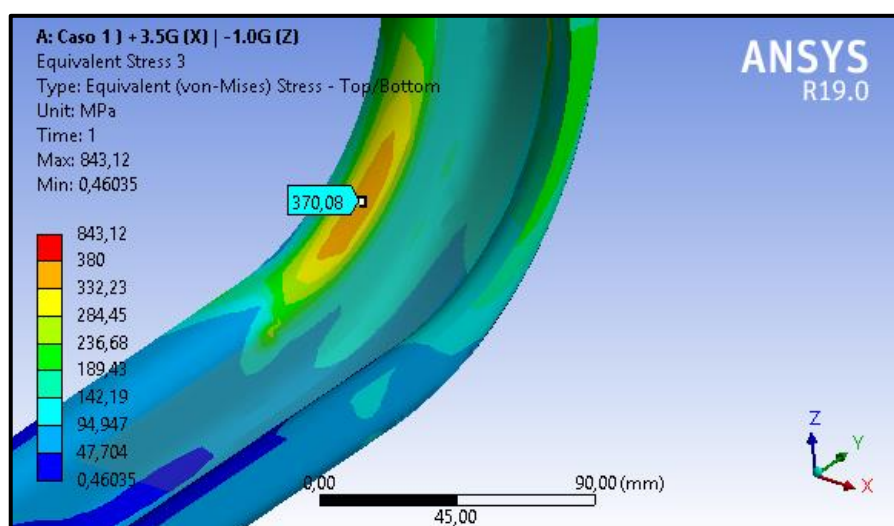
Nesta etapa serão apresentados os resultados da análise MEF do suporte em aço.

#### 4.1.1 Análise estática suporte de aço: caso de carregamento 1

Na figura 38, nota-se que as tensões de von Mises chegam a 370 MPa superando o limite de escoamento do material no ponto indicado. Considerando que a região está altamente encruada devido ao processo de conformação mecânica, seus limites de resistência são maiores e não causam uma falha no componente aprovado em campo, e sim, apenas um encruamento localizado.

Durante a análise, observou-se uma tensão extremamente elevada, de 843 MPa e próxima a região de fixação do suporte. Após alguns refinamentos notou-se que as tensões continuavam subindo, caracterizando uma singularidade e erro do método. Por esse motivo os resultados nessa região foram desprezados.

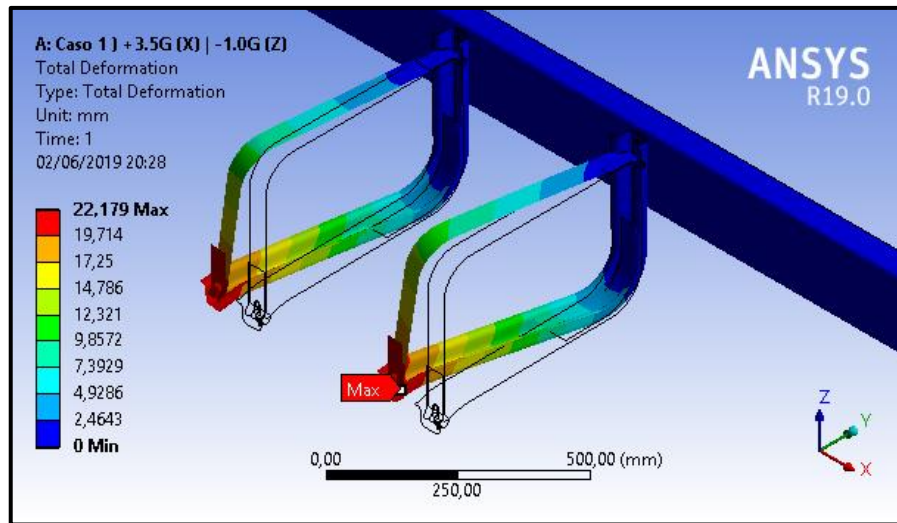
Figura 38 – Tensões resultantes para acelerações de +3,5G em X e -1,0G em Z



Fonte: O Autor (2019).

A deslocamento máximo encontrado foi maior no sentido longitudinal e demonstra um valor de 22,17 mm localizando-se na extremidade do suporte. Este resultado pode ser visualizado na figura 39. A representação gráfica está em uma escala de aumento de 5 vezes.

Figura 39 – Deslocamentos resultantes para acelerações de +3,5G em X e -1,0G em Z

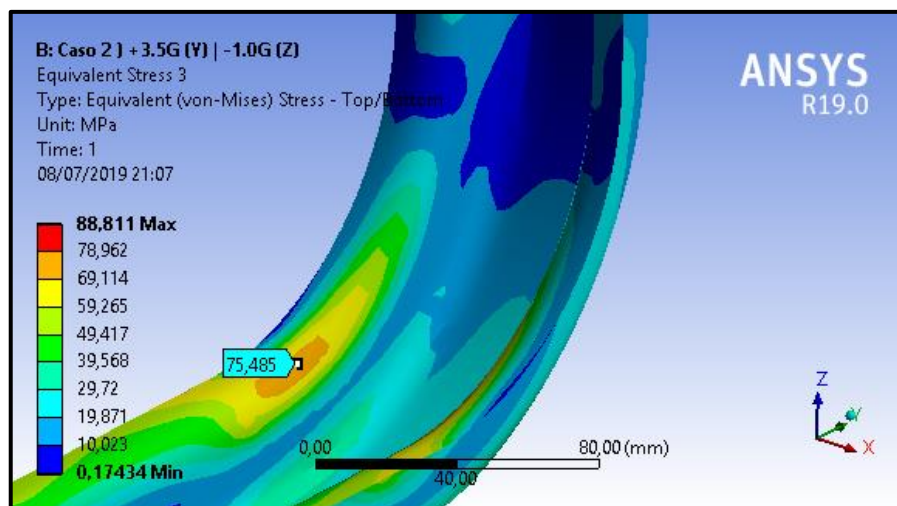


Fonte: O Autor (2019).

#### 4.1.2 Análise estática suporte de aço: caso de carregamento 2

Na figura 40 nota-se que a tensão máxima equivale a 75 MPa e localiza-se na curva do suporte. O valor observado está abaixo do limite de escoamento do material, garantindo a integridade do componente.

Figura 40 – Tensões resultantes para acelerações de +3,5G em Y e -1,0G em Z

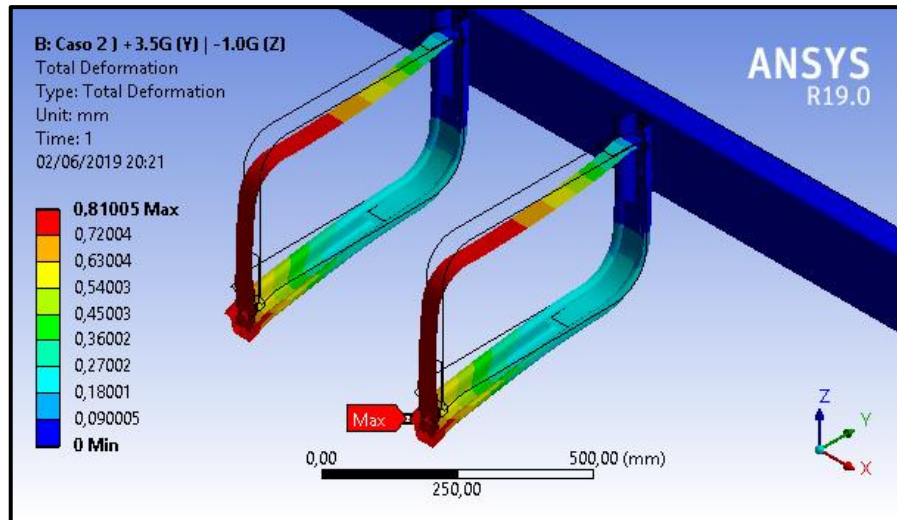


Fonte: O Autor (2019).

Os deslocamentos máximos encontrados foram maiores no sentido vertical e representam um valor de 0,81 mm na extremidade do suporte, podendo ser visualizados na figura 41. A representação gráfica está em uma escala com aumento de 68 vezes.



Figura 41 – Deslocamentos resultantes para acelerações de +3,5G em Y e -1,0G em Z

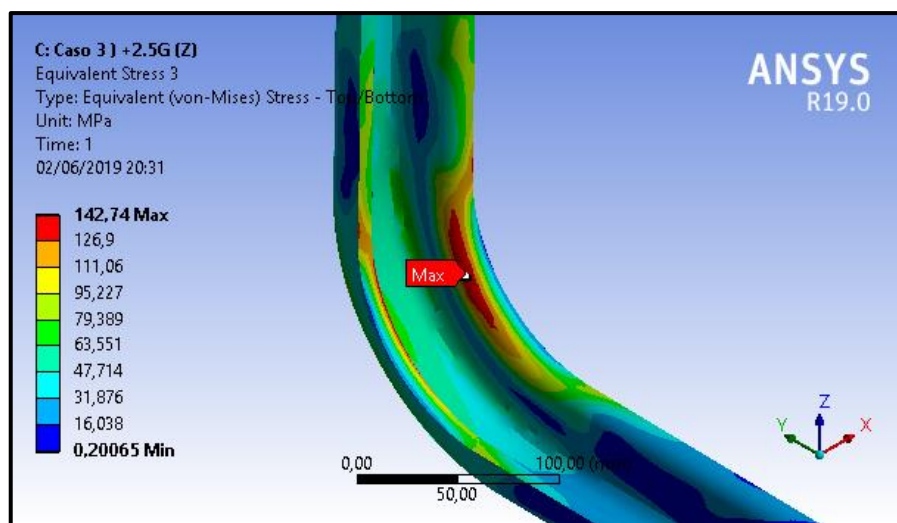


Fonte: O Autor (2019).

#### 4.1.3 Análise estática suporte de aço: caso de carregamento 3

Na figura 42 nota-se que a tensão máxima obtida é de 142 MPa e está localizada na região da curva do suporte. Os valores de tensão encontrados são abaixo do limite de escoamento do material.

Figura 42 – Tensões resultantes para aceleração de +2,5G em Z

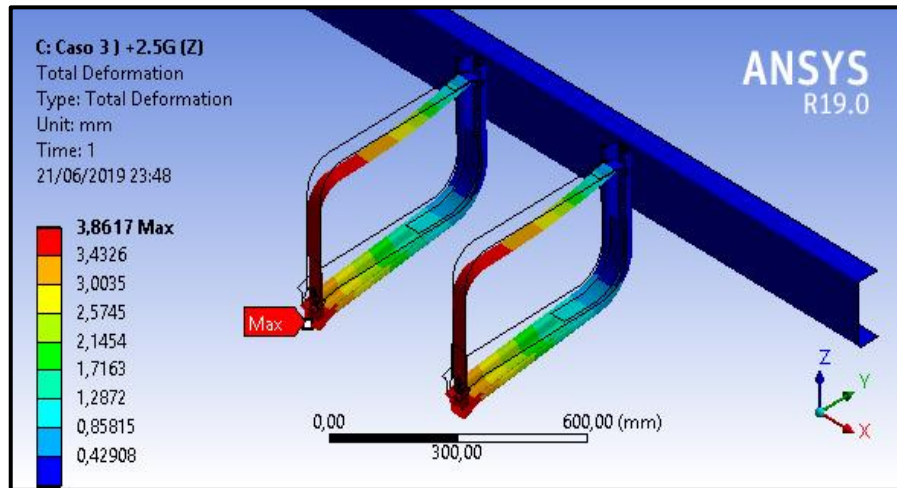


Fonte: O Autor (2019).

Os deslocamentos máximos obtidos foram maiores no sentido vertical e representam um valor de 3,86 mm na extremidade do suporte, podendo ser visualizados na figura 43. A

representação gráfica está em uma escala com aumento de 14 vezes.

Figura 43 – Deslocamentos resultantes para aceleração de +2,5G em Z

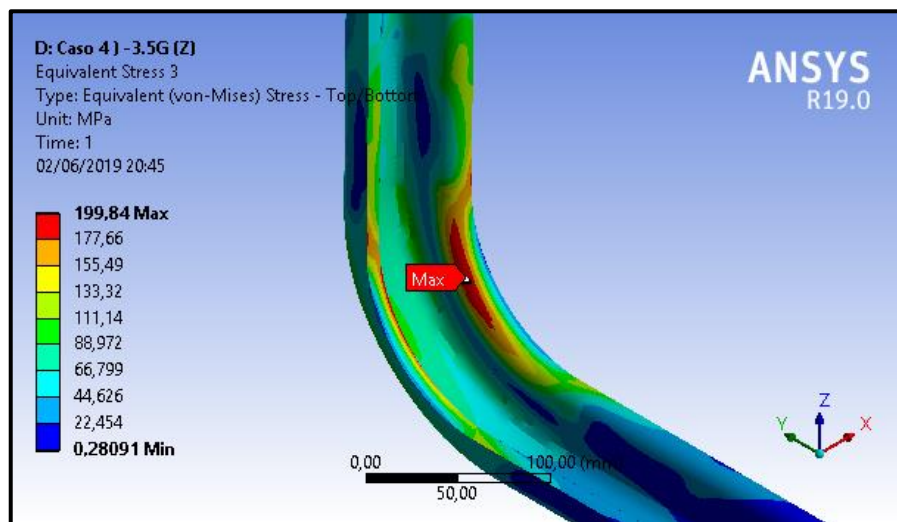


Fonte: O Autor (2019).

#### 4.1.4 Análise estática suporte de aço: caso de carregamento 4

Na figura 44 nota-se que as tensões resultantes são de 199 MPa. Novamente localizam-se na curva do suporte, os valores obtidos estão abaixo do limite de escoamento do material e portanto seguros.

Figura 44 – Tensões resultantes para aceleração de -3,5G em Z

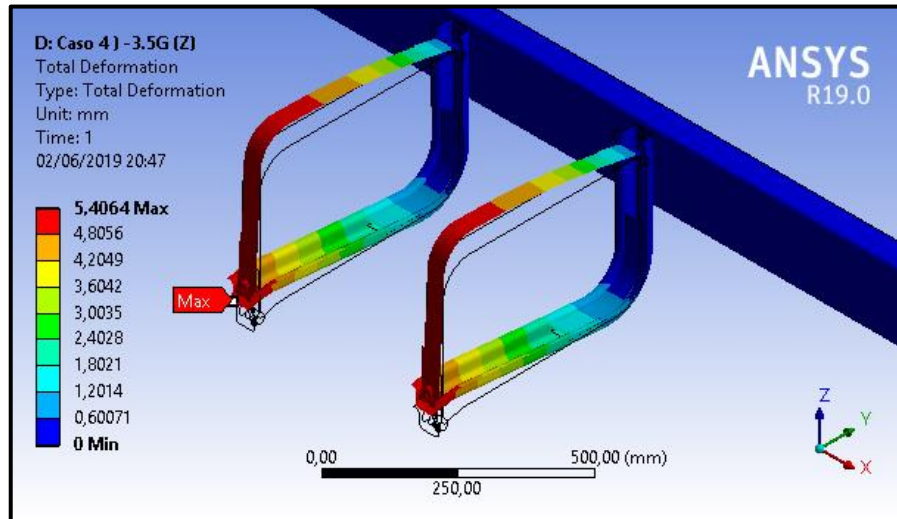


Fonte: O Autor (2019).

Os deslocamentos máximos encontrados foram maiores no sentido vertical e

representam um valor de 5,40 mm, podendo ser visualizados na figura 45. A representação gráfica está em uma escala com aumento de 10 vezes.

Figura 45 – Deslocamentos resultantes para aceleração de -3,5G em Z



Fonte: O Autor (2019).

#### 4.1.5 Análise modal: suporte de aço

O resultado de interesse na análise modal foi no modo de vibração no eixo vertical (Z) em que os suportes vibram independentemente entre si, esta condição contempla o principal movimento dos suportes sob efeito de vibração e equivale ao segundo modo. As frequências típicas e aceitáveis em critérios de projeto envolvendo componentes de chassi, são na ordem de 20 à 30Hz. Porém, nas análises observam-se valores abaixo desses limites de frequência com excessão da condição de tanque vazio. Seria necessário um estudo mais detalhado identificando as tensões envolvidas no processo de vibração. Possivelmente, devido ao elevado amortecimento, as tensões resultantes são demasiadamente baixas e não geram problemas do suporte aprovado em campo, fazendo que as frequências de excitação não sejam amplificadas a ponto de causar uma falha. Os valores obtidos são muito próximos de análises passadas que a empresa realizou em conjunto com grandes montadoras do setor automotivo, nunca constatou-se falha por fenômeno de fadiga.

Tabela 8 – 2º modo e frequências naturais do suporte de aço

Modo de vibração	Frequências naturais		
	Tanque cheio (175L)	Tanque médio (80L)	Tanque vazio (32L)
2	13,0Hz	17,8Hz	24,7Hz

Fonte: O Autor (2019).

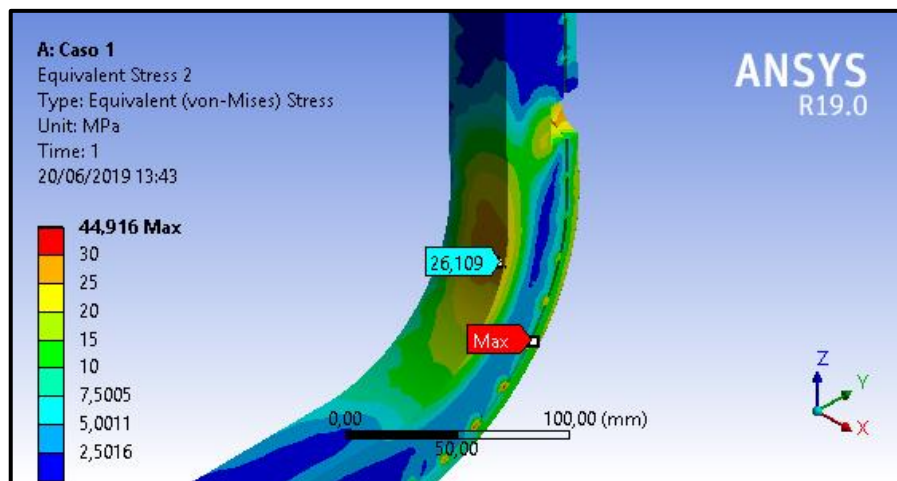
#### 4.2 ANÁLISE MEF SUPORTE HÍBRIDO ALMA CURTA

Nesta etapa serão apresentados os resultados da análise MEF do suporte híbrido com alma curta.

##### 4.2.1 Análise estática suporte híbrido alma curta: caso de carregamento 1

Como era esperado, as tensões máximas no polímero aparecem na região onde formam-se os botões através das furações existentes na alma metálica, devido a tecnologia *clinch-lock*. A tensão máxima está representada no ponto indicado na figura 46 e representa um valor de 44 MPa, entretanto não supera o limite de escoamento do material.

Figura 46 – Tensões resultantes para acelerações de +3,5G em X e -1,0G em Z



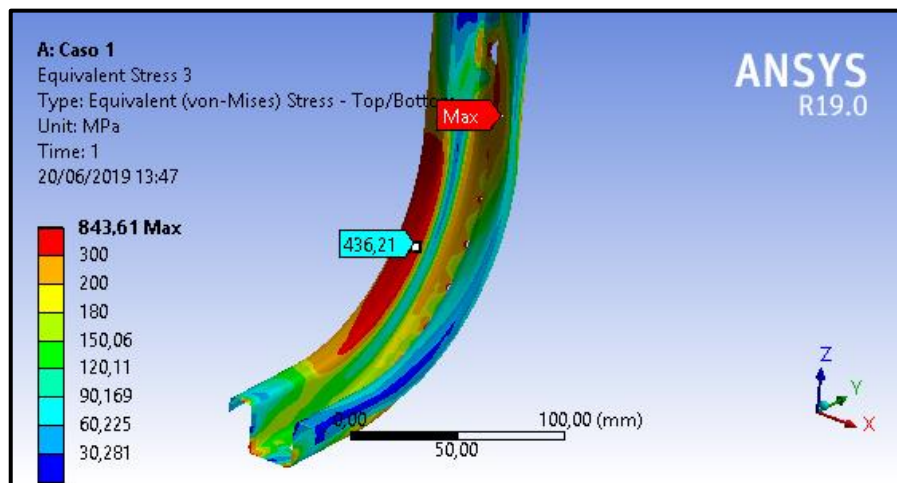
Fonte: O Autor (2019).

Na análise da alma metálica é possível perceber que as tensões são demasiadamente altas e provocariam uma falha do componente superando os limites de escoamento em várias regiões da peça, a figura 47 demonstra esses resultados.

O modelo inicial híbrido possui uma significativa redução de espessura em sua alma metálica se comparado ao leito do suporte em aço original. Não possui reforço na curva, resultando uma tensão de 436 MPa nesta região. Propriedades mecânicas do material são inferiores e por final as furações na alma também contribuem para a redução da resistência mecânica e concentração de tensões, podendo ser visualizadas na figura 48.

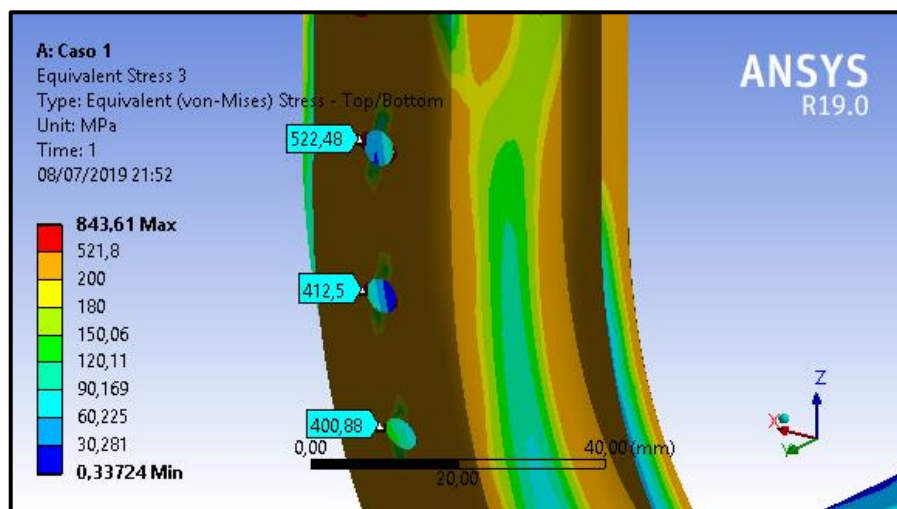
Existe a presença de uma região de singularidade localizada no furo de fixação do suporte. Essa tensão máxima de 843 MPa foi desprezada nos resultados da análise.

Figura 47 – Tensões resultantes para acelerações de +3,5G em X e -1,0G em Z



Fonte: O Autor (2019).

Figura 48 – Tensões resultantes para acelerações de +3,5G em X e -1,0G em Z

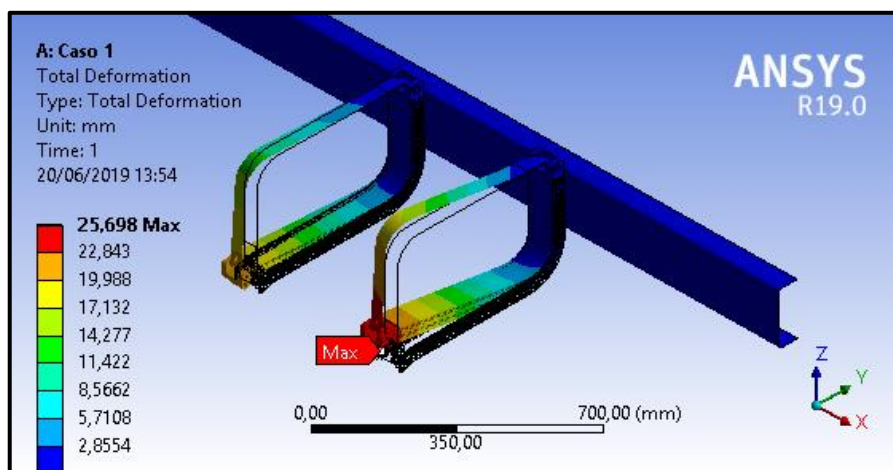


Fonte: O Autor (2019).

Os deslocamentos máximos encontrados no suporte foram maiores que os obtidos no

suporte em aço, também no sentido longitudinal e demonstram um valor de 25,6 mm. Estes resultados podem ser visualizados na figura 49. A representação gráfica está em um escala de aumento de 2,5 vezes.

Figura 49 – Deslocamentos resultantes para acelerações de +3,5G em X e -1,0G em Z



Fonte: O Autor (2019).

Dentro desse contexto, o modelo 3D teve que ser reprojetoado afim de aumentar sua rigidez e os demais resultados não serão expostos no trabalho, uma vez que o componente apresentou falha na primeira condição de análise.

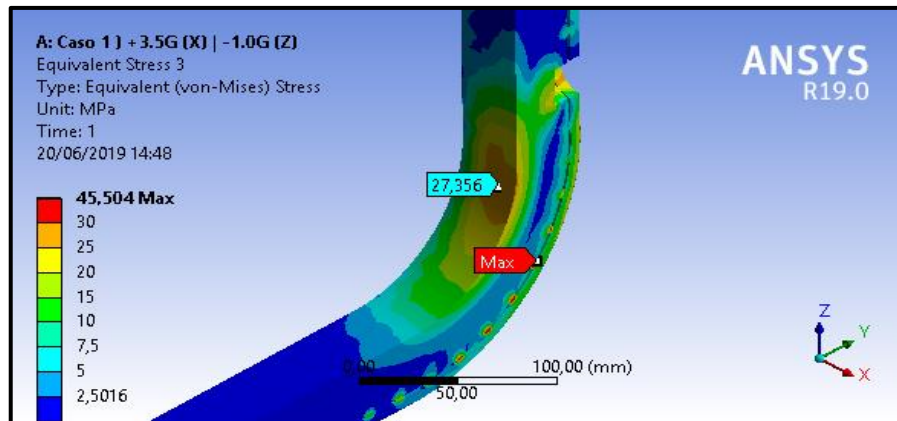
#### 4.3 ANÁLISE MEF SUPORTE HÍBRIDO ALMA LONGA I

Nesta etapa serão apresentados os resultados da análise MEF do suporte híbrido com alma longa.

##### 4.3.1 Análise estática suporte híbrido alma longa I: caso de carregamento 1

No primeiro caso de carregamento da análise estática, os resultados obtidos são muito próximos do modelo com alma curta e nenhuma região de tensão supera o limite de escoamento do material. Esses resultados podem ser visualizados na figura 50. A maior tensão está presente na região dos botões que se formam através da passagem do polímero pelas furações da alma metálica, chegando a um valor máximo de 45 MPa. Na região da curva do suporte os valores chegam a 27MPa.

Figura 50 – Tensões resultantes para acelerações de +3,5G em X e -1,0G em Z

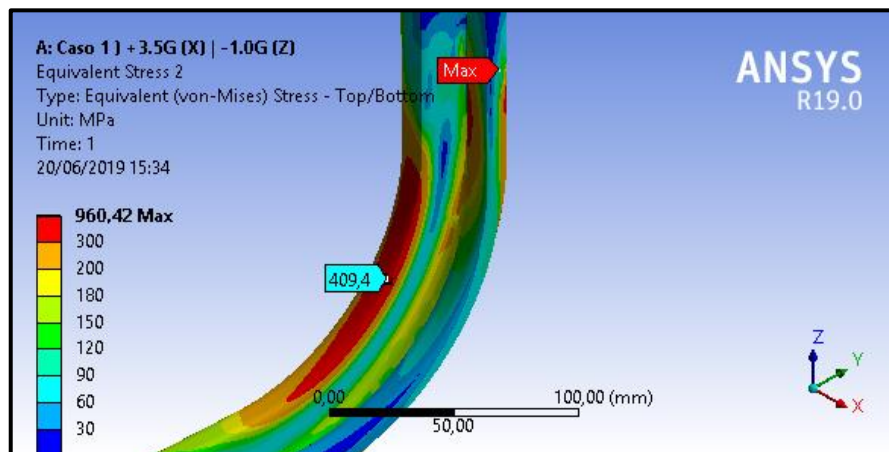


Fonte: O Autor (2019).

Na alma metálica as tensões superam o limite de escoamento do material na região da curva, chegando a 409 MPa, porém a área dessas tensões diminui significativamente quando comparado ao modelo híbrido alma curta. Tomando-se em conta que essa região está altamente encruada e com um limite de resistência maior, pode-se concluir que o componente não falharia neste ponto. O resultado dessas tensões estão representados na figura 51. Além disso, nota-se uma tensão extremamente elevada de 960 MPa no furo de fixação do componente, identificada como uma singularidade, e será desprezada dos resultados.

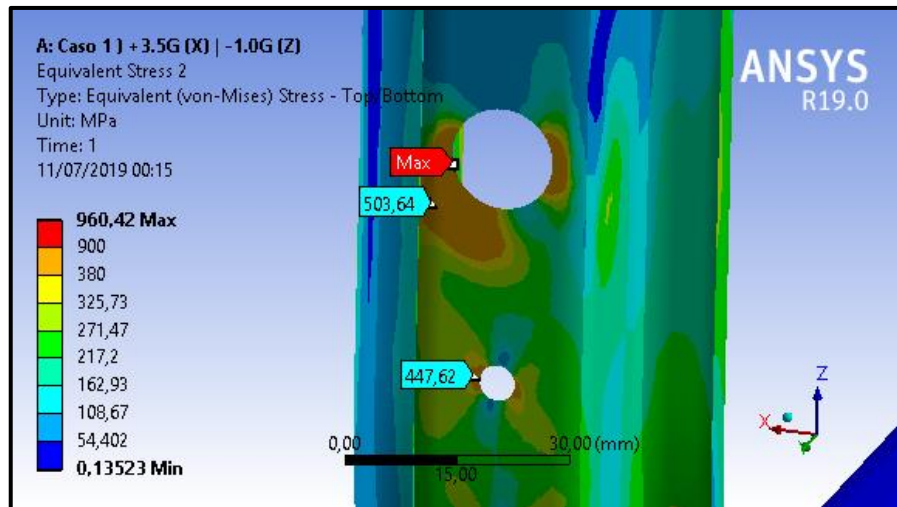
A figura 52 demonstra as tensões resultantes na região próxima a fixação, nota-se novamente concentradores de tensão nas furações da alma metálica nos pontos indicados, demonstrando uma falha. Na figura 53 é possível verificar os deslocamentos obtidos, sendo maiores no sentido longitudinal e menores que no modelo híbrido alma curta, representando um valor de 21,4 mm e em uma escala de aumento de 2,8 vezes.

Figura 51 – Tensões resultantes para acelerações de +3,5G em X e -1,0G em Z



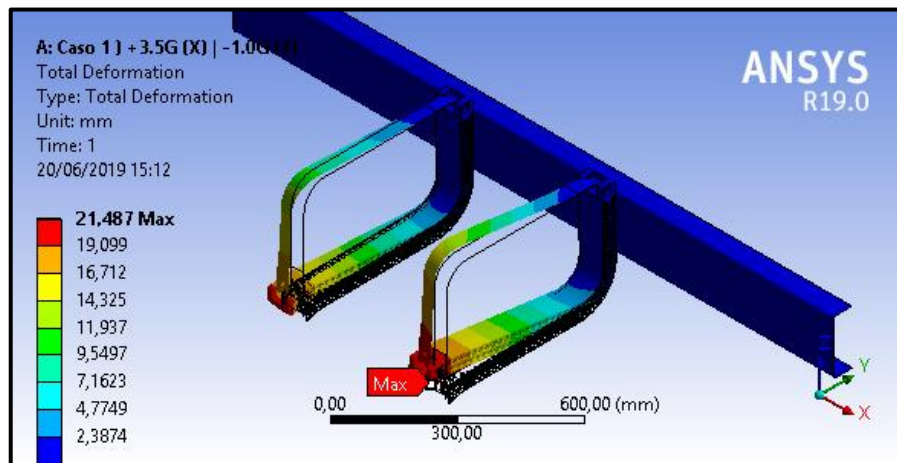
Fonte: O Autor (2019).

Figura 52 – Tensões resultantes para acelerações de +3,5G em X e -1,0G em Z



Fonte: O Autor (2019).

Figura 53 – Deslocamentos resultantes para acelerações de +3,5G em X e -1,0G em Z



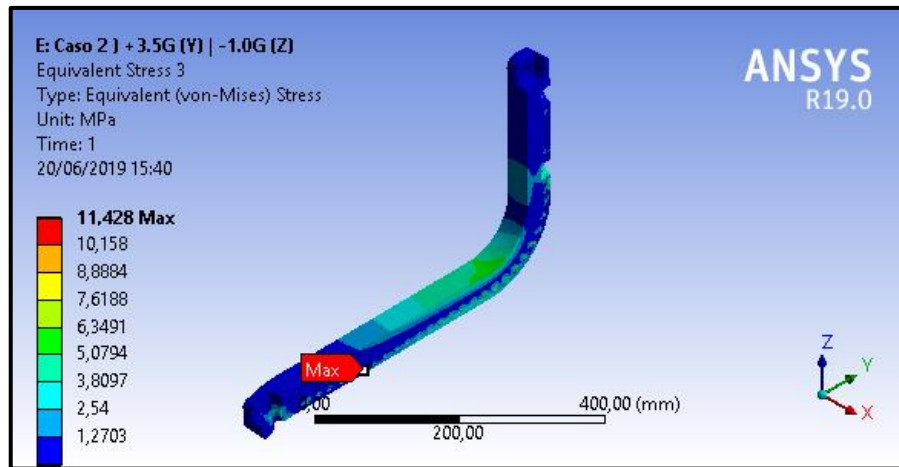
Fonte: O Autor (2019).

#### 4.3.2 Análise estática suporte híbrido alma longa I: caso de carregamento 2

Para o segundo caso de carregamento, as tensões resultantes no polímero são demonstradas na figura 55, novamente as máximas aparecem nos botões que se formam através da alma metálica. A tensão máxima encontrada foi de 11,4 MPa e encontra-se abaixo do limite de escoamento do material.



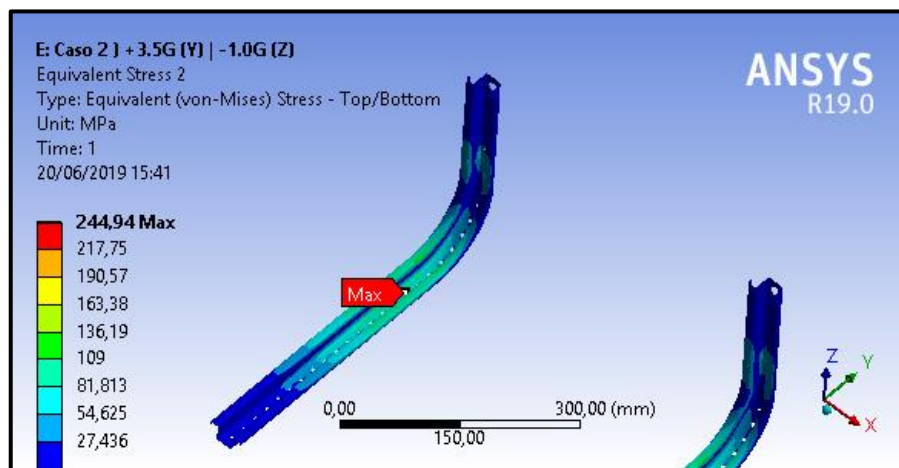
Figura 54 – Tensões resultantes para acelerações de +3,5G em Y e -1,0G em Z



Fonte: O Autor (2019).

Na alma metálica, as tensões podem ser visualizadas na figura 55. O valor máximo encontrado é devido a uma furação presente na alma e que concentra uma tensão máxima de 244 MPa, porém não supera os limites do material.

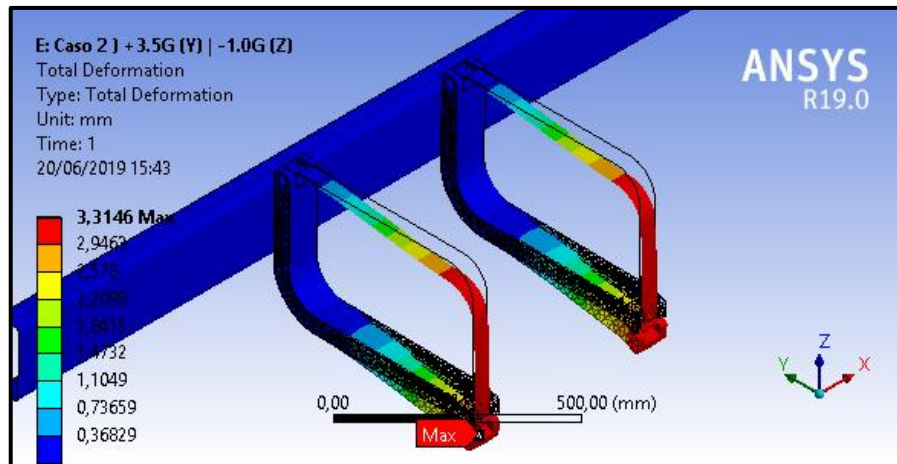
Figura 55 – Tensões resultantes para acelerações de +3,5G em Y e -1,0G em Z



Fonte: O Autor (2019).

Os deslocamentos encontrados podem ser visualizados na figura 56 em uma escala de aumento de 16 vezes, e representam um valor máximo de 3,31 mm localizado na extremidade do suporte. Dentro desses resultados, para este caso de carregamento o suporte híbrido alma longa está dentro dos limites de escoamento do material.

Figura 56 – Deslocamentos resultantes para acelerações de +3,5G em Y e -1,0G em Z

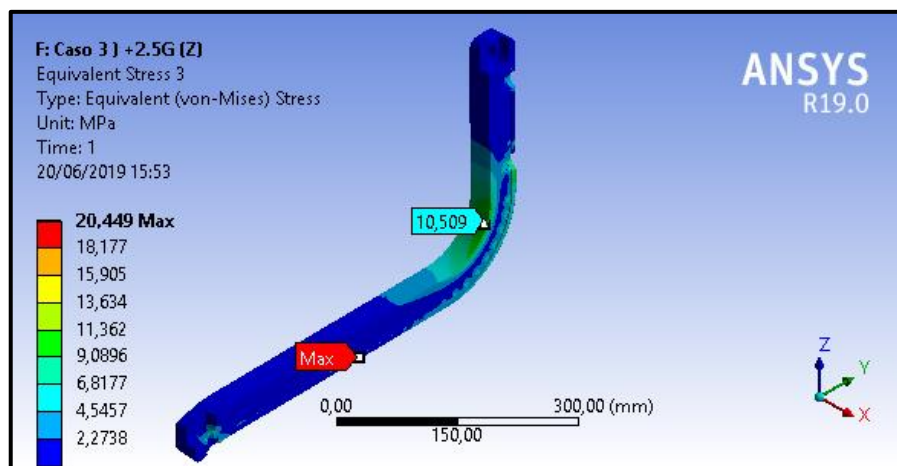


Fonte: O Autor (2019).

#### 4.3.3 Análise estática suporte híbrido alma longa I: caso de carregamento 3

Para o primeiro caso de carregamento vertical de aceleração, as tensões no polímero chegam a 20 MPa no ponto indicado na figura 57. Na região da curva aparece o segundo ponto com as maiores tensões, chegando a 10,7 MPa.

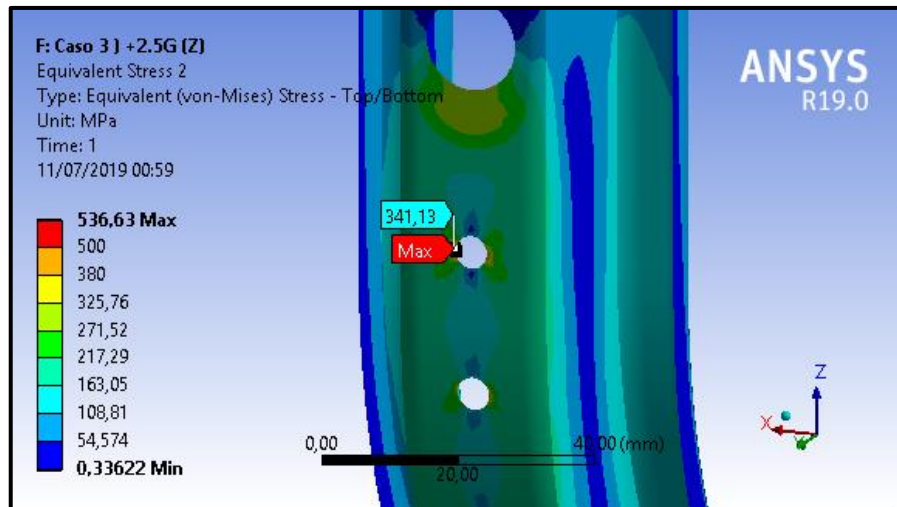
Figura 57 – Tensões resultantes para aceleração de 2,5G em Z



Fonte: O Autor (2019).

Na análise da alma metálica, as tensões novamente concentra-se nas furações, representado na figura 58, demonstrando novamente um problema de falha e uma tensão máxima de 341 MPa. A tensão máxima de 536 MPa caracteriza-se por uma singularidade. As demais tensões ao longo do componente estão dentro dos limites de escoamento do material.

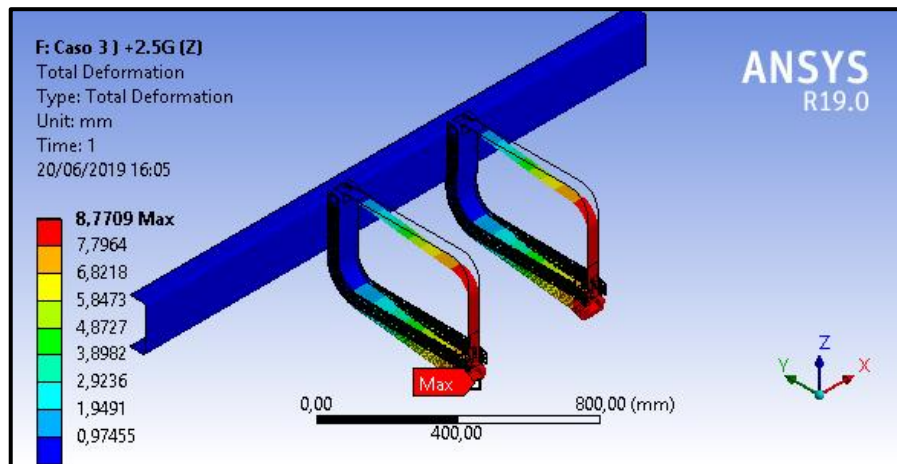
Figura 58 – Tensões resultantes para aceleração de 2,5G em Z



Fonte: O Autor (2019).

Na análise dos deslocamentos, pode-se verificar um valor máximo de 8,77 mm na figura 59, a representação gráfica está demonstrada com uma escala de aumento de 6,1 vezes.

Figura 59 – Deslocamentos resultantes para aceleração de 2,5G em Z

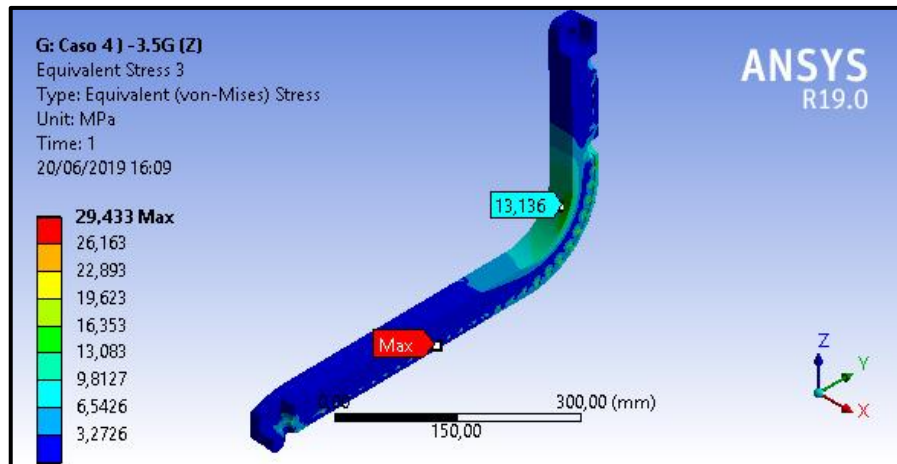


Fonte: O Autor (2019).

#### 4.3.4 Análise estática suporte híbrido alma longa I: caso de carregamento 4

No último caso da análise estática e carregamento unicamente vertical, nota-se que as tensões maiores no polímero aparecem no ponto demonstrado na figura 60 chegando um valor máximo de 29 MPa. O segundo ponto com maiores tensões localiza-se na curva do suporte e chega a um valor máximo de 13 MPa.

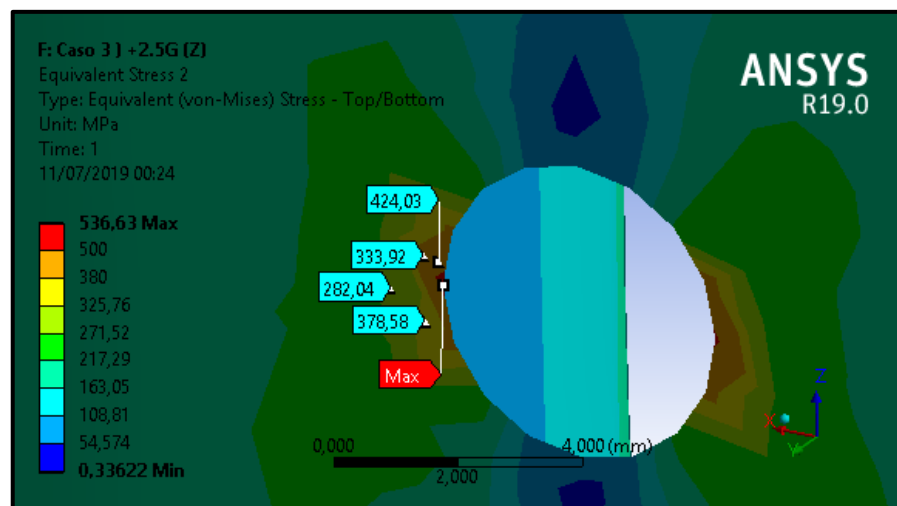
Figura 60 – Tensões resultantes para aceleração de -3,5G em Z



Fonte: O Autor (2019).

Na alma metálica, novamente é possível perceber a presença de concentração de tensões nas furações do método de adesão *clinch-lock*. Estes resultados podem ser visualizados na figura 61 e localizam-se no primeiro furo logo abaixo do ponto de fixação, chegando a um valor máximo de 424 MPa, causando falha no componente. Verificou-se uma singularidade de tensão, no elemento com tensão máxima de 536MPa, o qual foi desprezada dos resultados.

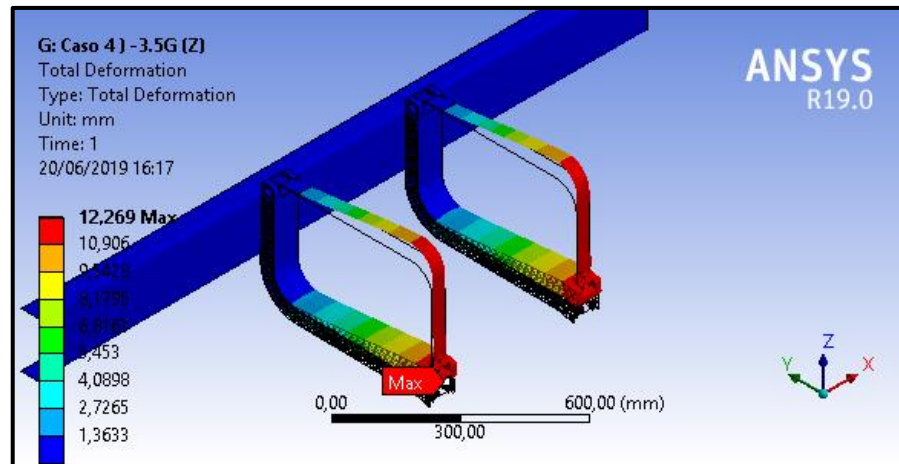
Figura 61 – Tensões resultantes para aceleração de -3,5G em Z



Fonte: O Autor (2019).

Na figura 62 é possível perceber que os deslocamentos resultantes chegam a um valor máximo de 12,26 mm na extremidade do suporte. A representação gráfica está demonstrada com uma escala de aumento de 4,3 vezes.

Figura 62 – Deslocamentos resultantes para aceleração de -3,5G em Z



Fonte: O Autor (2019).

#### 4.3.5 Análise modal: suporte híbrido alma longa I

Os resultado de interesse na análise modal assim como no suporte em aço, foi no modo de vibração no eixo vertical (Z) em que os suportes vibram independentemente entre si, e equivale ao primeiro modo de vibração do conjunto. Como era esperando, os valores de frequência naturais obtidos foram menores que no suporte de aço e são demonstrados na tabela 9, ainda sendo baixos quando a comparados ao valores aceitáveis em critérios de projeto (20 – 30Hz). Seria necessário um estudo mais detalhado envolvendo as tensões no processo para compreender os efeitos desses resultados e verificar se mesmo em frequências baixas, a amplificação do sinal vibratório poderia causar uma falha no componente. Vale salientar que a parte polimérica ajuda no processo de amortecimento das vibrações.

Tabela 9 – 1º modo e frequências naturais do suporte híbrido alma longa

Modo de vibração	Frequências naturais		
	Tanque cheio (175L)	Tanque médio (80L)	Tanque vazio (32L)
1	7,06Hz	11,12Hz	16,32Hz

Fonte: O Autor (2019).

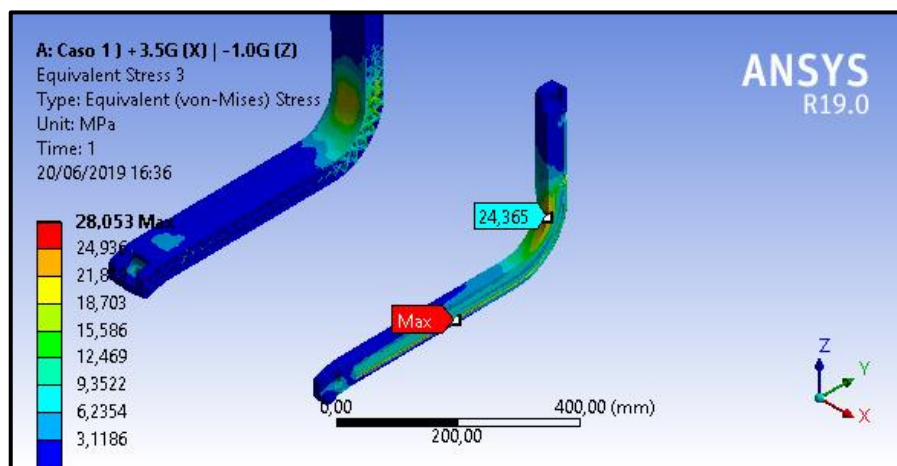
#### 4.4 ANÁLISE MEF SUPORTE HÍBRIDO ALMA LONGA II

Nesta etapa serão apresentados os resultados da análise MEF do suporte híbrido com alma longa II.

#### 4.4.1 Análise estática suporte híbrido alma longa II: caso de carregamento 1

No primeiro caso de carregamento, verifica-se que as tensões no polímero reduziram em relação as demais análises e estão dentro do limite de escoamento do material. A figura 63 demonstras as regiões com maiores tensões, 28 MPa para o ponto indicado e 24 MPa na curva do suporte.

Figura 63 – Tensões resultantes para acelerações de +3,5G em X e -1,0G em Z



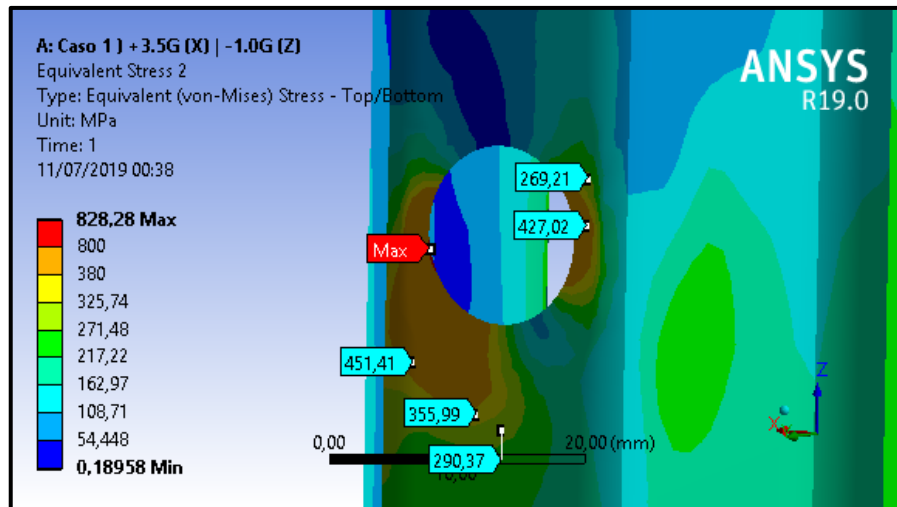
Fonte: O Autor (2019).

Na análise da alma metálica, as tensões máximas aparecem devido a concentração de tensão no furo de fixação do suporte, podendo ser visualizado na figura 64. Nesse ponto de fixação, é soldado o parafuso e batente de fixação. Por ser uma região demasiadamente estruturada não representa uma área suscetível a falha. Nota-se uma região de singularidade, assim como nos outros casos e de magnitude 828 MPa.

Na figura 65 é possível verificar que as maiores tensões da alma estão presentes na curva do componente, representando um valor de 335 MPa no ponto indicado, e se encontram dentro dos limites de escoamento do material.

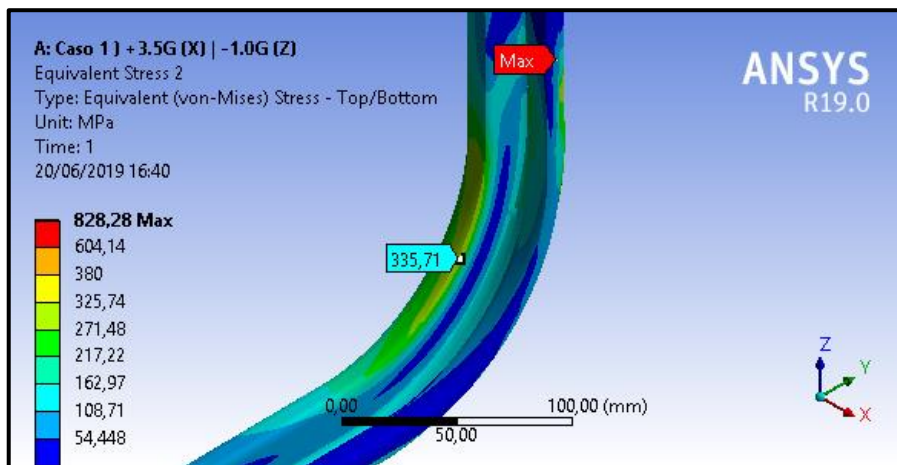
O deslocamento máximo observado é no sentido longitudinal e reduziu em relação às outras análises, podendo ser visualizado na figura 66. O valor máximo obtido foi de 15,19 mm e a representação gráfica na figura está em uma escala de aumento de 4,3 vezes.

Figura 64 – Tensões resultantes para acelerações de +3,5G em X e -1,0G em Z



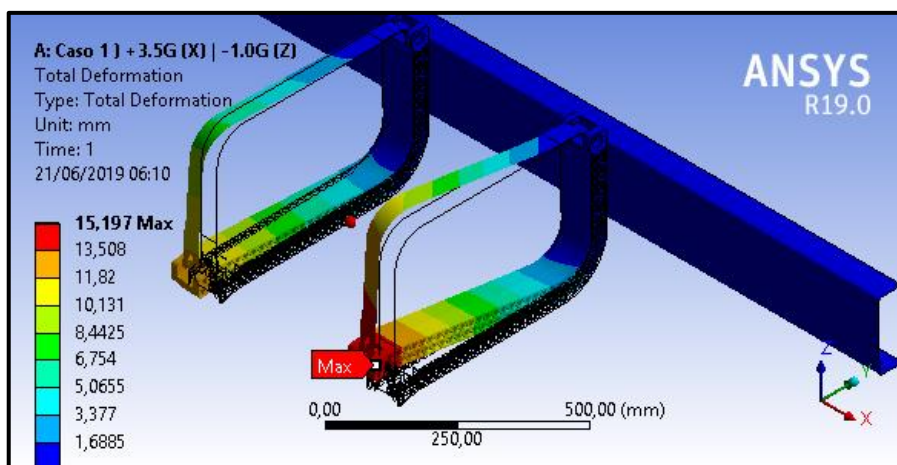
Fonte: O Autor (2019).

Figura 65 – Tensões resultantes para acelerações de +3,5G em X e -1,0G em Z



Fonte: O Autor (2019).

Figura 66 – Deslocamentos resultantes para acelerações de +3,5G em X e -1,0G em Z

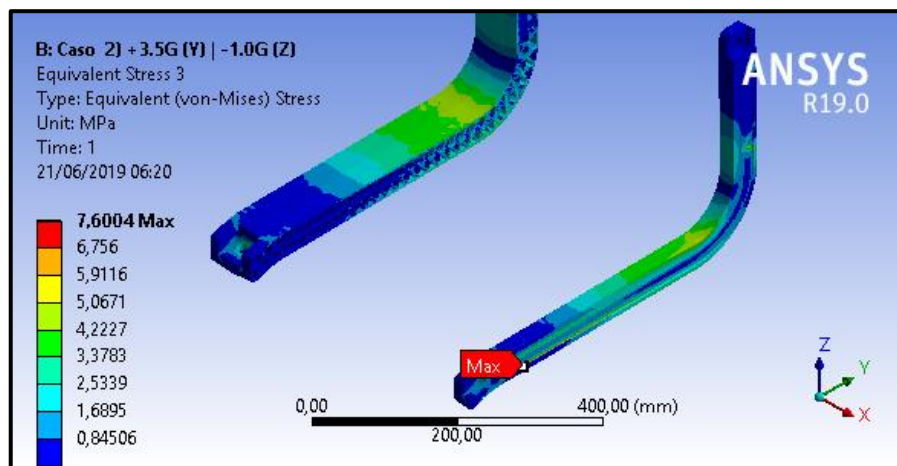


Fonte: O Autor (2019).

#### 4.4.2 Análise estática suporte híbrido alma longa II: caso de carregamento 2

No segundo caso de carregamento, a tensão máxima no polímero aparece no ponto indicado na figura 67, representando um valor de 7 MPa. Os valores encontram-se dentro do limite de escoamento do material.

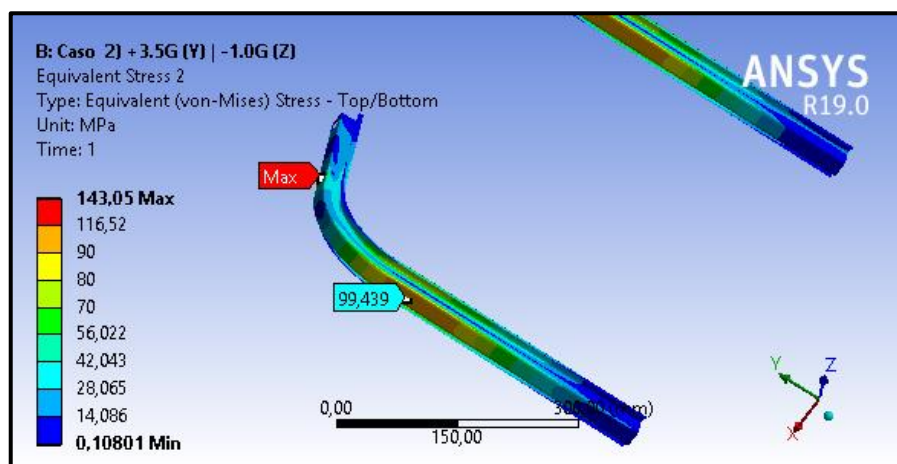
Figura 67 – Tensões resultantes para acelerações de +3,5G em Y e -1,0G em Z



Fonte: O Autor (2019).

Na análise da alma metálica o componente também suporta os carregamentos impostos, observa-se uma tensão de 99 MPa no ponto indicado na figura 68.

Figura 68 – Tensões resultantes para acelerações de +3,5G em Y e -1,0G em Z

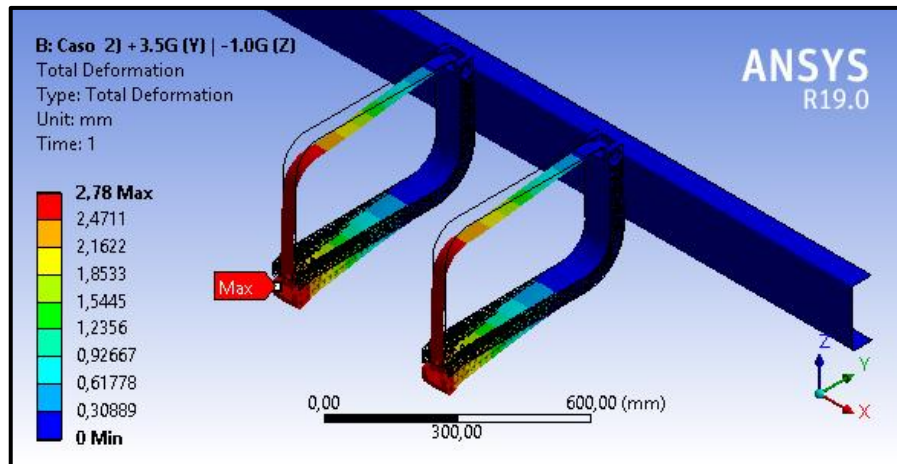


Fonte: O Autor (2019).

Os resultados dos deslocamentos podem ser visualizados na figura 69, o valor máximo encontrado foi 2,78 mm, no sentido vertical e localiza-se na extremidade do suporte.



Figura 69 – Deslocamentos resultantes para acelerações de +3,5G em Y e -1,0G em Z

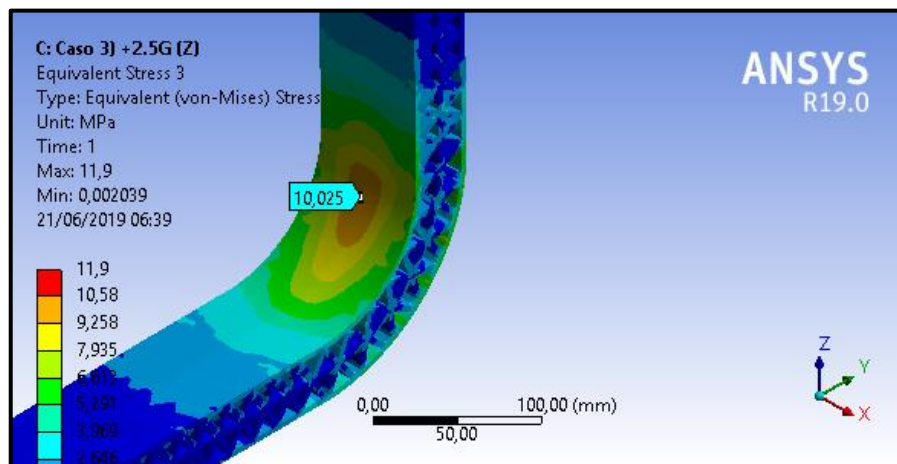


Fonte: O Autor (2019).

#### 4.4.3 Análise estática suporte híbrido alma longa II: caso de carregamento 3

Para o primeiro caso de carregamento unicamente vertical, observa-se a maior tensão crítica na curva do suporte, possuindo um valor de 10 MPa e representado na figura 70.

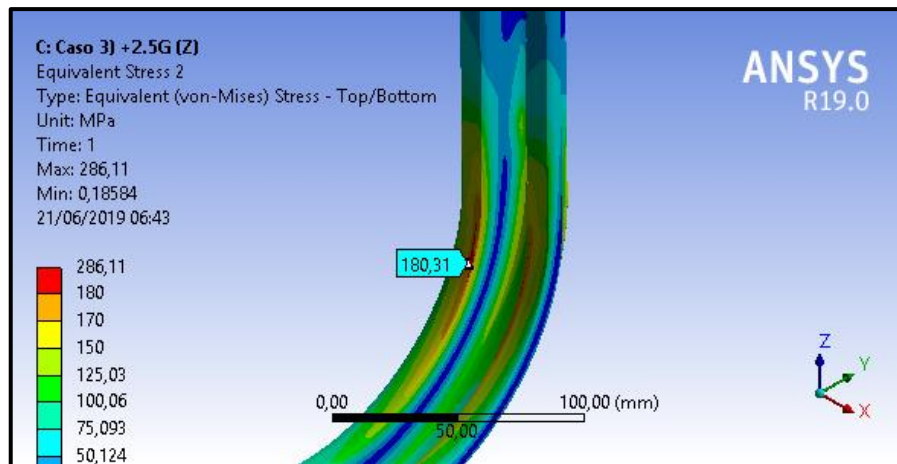
Figura 70 – Tensões resultantes para aceleração de 2,5G em Z



Fonte: O Autor (2019).

Os resultados de tensão na alma metálica podem ser visualizados na figura 71. O valor máximo equivale a 180 MPa e localiza-se na curva do componente conforme indicado na figura.

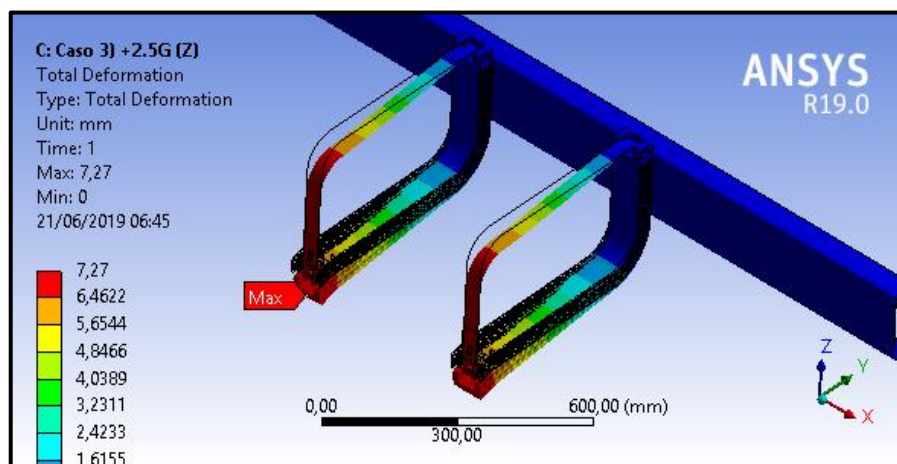
Figura 71 – Tensões resultantes para aceleração de 2,5G em Z



Fonte: O Autor (2019).

Os deslocamentos obtidos podem ser visualizados na figura 72, o valor máximo obtido foi de 7,27 mm e localiza-se na extremidade do suporte. A figura está representada com uma escala de aumento de 7,4 vezes.

Figura 72 – Deslocamentos resultantes para aceleração de 2,5G em Z

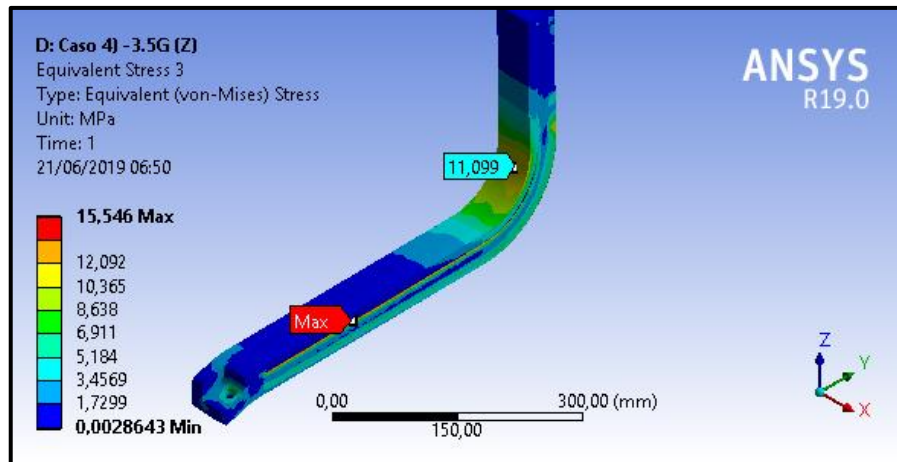


Fonte: O Autor (2019).

#### 4.4.4 Análise estática suporte híbrido alma longa II: caso de carregamento 4

Para este caso de carregamento, a tensão máxima observada no polímero foi de 15 MPa no ponto indicado da figura 73. Na curva do suporte o valor de tensão obtido equivale a 11 MPa.

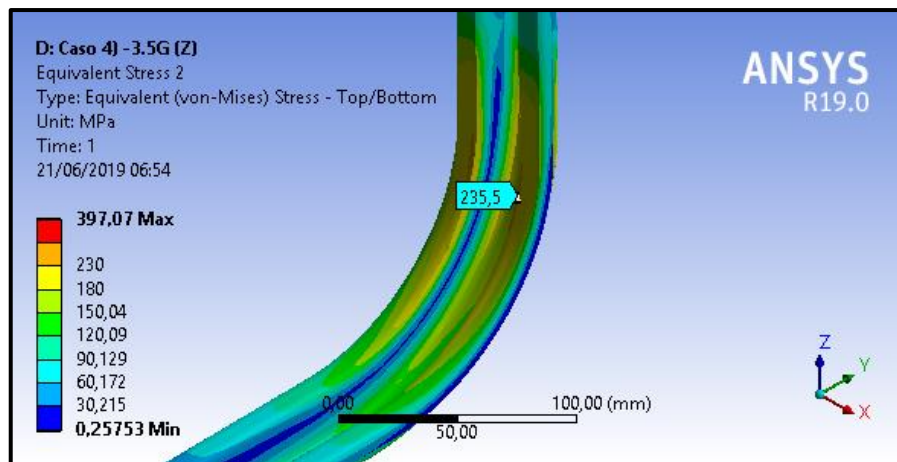
Figura 73 – Tensões resultantes para aceleração de -3,5G em Z



Fonte: O Autor (2019).

Na alma metálica, nota-se uma tensão mais elevada na curva do suporte e representa um valor de 235 MPa. Este resultado pode ser observado na figura 74, também dentro do limite de escoamento do material.

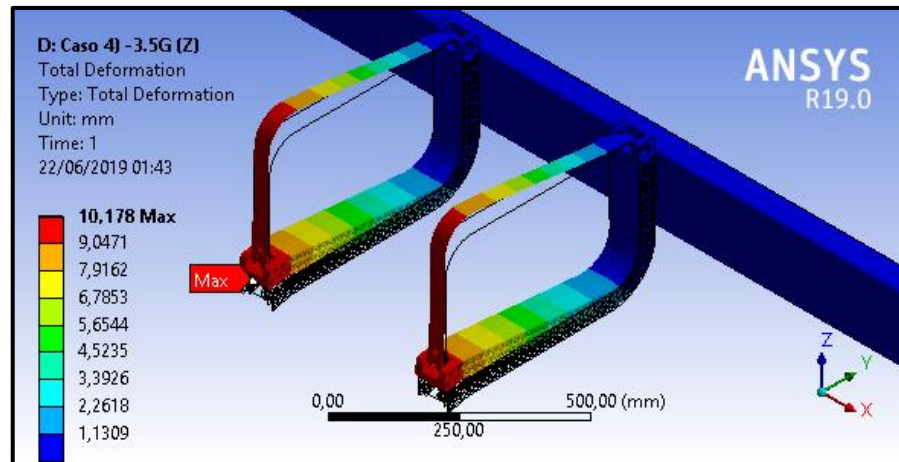
Figura 74 – Tensões resultantes para aceleração de -3,5G em Z



Fonte: O Autor (2019).

No resultado dos deslocamentos, representados na figura 75, observa-se um valor máximo de 10,17 mm. O deslocamento está representado na figura com uma escala de aumento de 5,3 vezes.

Figura 75 – Deslocamentos resultantes para aceleração de -3,5G em Z



Fonte: O Autor (2019).

#### 4.4.5 Análise modal: suporte híbrido alma longa II

Nesta análise modal obteve-se os melhores resultados quando comparados as outras análises, inclusive em relação ao atual suporte em aço. Com exceção da situação com tanque cheio, as frequências observadas estão dentro dos critérios de projeto estipulados (20 – 30Hz). Para o caso em que a frequência natural observada foi baixa, assim como nos outros resultados obtidos, é necessário um estudo minucioso para compreender se as tensões e deformações podem ser amplificadas a ponto de causar uma falha no suporte.

Tabela 10 – 1º modo e frequências naturais do suporte híbrido alma longa II

Modo de vibração	Frequências naturais		
	Tanque cheio (175L)	Tanque médio (80L)	Tanque vazio (32L)
1	16,53Hz	25,97Hz	37,99Hz

Fonte: O Autor (2019).

#### 4.5 COMPARATIVO DE RESULTADOS

Para melhor representação do trabalho, as tabelas 11 e 12 demonstram os resultados de tensões e deslocamentos, assim como as frequências naturais e modos obtidos nas diferentes análises realizadas.

Tabela 11 – Comparativo de resultados: análise estática

Análise	Resultado	Casos de Carregamento			
		1	2	3	4
Suporte de aço (atual)	Tensão máxima	370 MPa	75 MPa	142 MPa	199 MPa
	Deslocamento máximo	22,17 mm	0,81mm	3,86mm	5,40mm
Suporte híbrido alma curta	Tensão máxima polímero	44 MPa	N/A	N/A	N/A
	Tensão máxima alma metálica	409 MPa	N/A	N/A	N/A
	Deslocamento máximo	25,68mm	N/A	N/A	N/A
Suporte híbrido alma longa I	Tensão máxima polímero	45 MPa	11 MPa	20 MPa	29 MPa
	Tensão máxima alma metálica	409 MPa	244 MPa	341 MPa	424 MPa
	Deslocamento máximo	21,48 mm	3,31 mm	8,77 mm	12,26 mm
Suporte híbrido alma longa II	Tensão máxima polímero	28 MPa	7 MPa	10 MPa	11 MPa
	Tensão máxima alma metálica	451 MPa	99 MPa	180 MPa	235 MPa
	Deslocamento máximo	15,19 mm	2,78 mm	7,27 mm	10,17 mm

Fonte: O Autor (2019).

Tabela 12 – Comparativo de resultados: análise modal

(continua)

Componente	Modo de vibração	Resultado	Caso de análise		
			Tanque cheio	Tanque médio	Tanque vazio
Suporte de aço (atual)	2	Frequência natural	13,0Hz	17,8Hz	24,7Hz

(conclusão)

Componente	Modo de vibração	Resultado	Caso de análise		
			Tanque cheio	Tanque médio	Tanque vazio
Suporte híbrido alma curta	N/A	Frequência natural	N/A	N/A	N/A
Suporte híbrido alma longa I	1		7,06Hz	11,12Hz	16,32Hz
Suporte híbrido alma longa II	1		16,53Hz	25,97Hz	37,99Hz

Fonte: O Autor (2019).

## 5 CONCLUSÃO

As análises realizadas nas diferentes configurações do suporte de tanque híbrido de metal e polímero possibilitaram um significativo aprendizado. Foi necessário contemplar o comportamento elástico não linear do polímero e definir um modelo de contato entre os diferentes substratos, para que tornasse o modelo de análise mais próximo da realidade. Também foi estipulado um fator de redução nos limites de resistência do material compósito polimérico para que suas propriedades físicas fossem consideradas isotrópicas. Os carregamentos como entrada do problema, foram definidos na forma de acelerações e obtidos de estudos anteriores, a partir de testes experimentais em pistas por parceiros da empresa e representam a proximidade do modelo teórico com os carregamentos reais.

Através dos resultados obtidos é possível concluir que a tecnologia híbrida tem um grande potencial para ser utilizada em projetos futuros da empresa. A redução de massa do conjunto suporte do tanque não foi possível para atender os critérios de validação, entretanto a redução de etapas do processo produtivo e o estudo da nova tecnologia devem ser valorizados. Os resultados da análise estática do componente híbrido alma longa II foram satisfatórios em termos de rigidez quando comparados ao modelo atual em aço. Nas diferentes tecnologias de adesão estudadas, pode-se verificar que o método *clinch-lock* apresenta falhas devido ao excesso de concentração de tensões nas furações da alma metálica. No caso da tecnologia híbrida com promotor de adesão, os resultados demonstram que o componente garante sua integridade estrutural nas diferentes condições de análise, e, portanto, atende os critérios estipulados.

Na análise modal obteve-se resultados abaixo do esperado na maioria dos casos, seria necessário um estudo mais detalhado dos efeitos provenientes das baixas frequências naturais observadas.

## 5.1 SUGESTÃO DE TRABALHOS FUTUROS

Otimizar a parte polimérica do suporte com o objetivo de reduzir sua massa.

Outro tema que pode ser avaliado é verificar os fenômenos de relaxação de tensões, fluência de tensões e fadiga no componente em polímero.

Avaliar os efeitos da movimentação do líquido no tanque, através do estudo da dinâmica de fluidos *slosh*.

Na análise MEF, assim como no modelo de material do compósito, efetuar a análise considerando o comportamento não linear do aço.

Por fim, sugere-se desenvolver um protótipo do modelo híbrido e ensaiar o mesmo em campo.



## REFERÊNCIAS

- ALVES FILHO, A. **Elementos Finitos: a base da tecnologia CAE / análise dinâmica**. 1. ed. São Paulo: Érica, 2005.
- ALVES FILHO, A. **Elementos Finitos: a base da tecnologia CAE**. 5. ed. São Paulo: Érica, 2012.
- ALVES FILHO, A. **Elementos Finitos: a base da tecnologia CAE / análise não linear**. 1. ed. São Paulo: Érica, 2012.
- AZEVEDO, A. F. M. **Método dos Elementos Finitos**. 1. ed. Porto: Faculdade de Engenharia da Universidade de Porto, 2003.
- BEPO COMPONENTES AUTOMOTIVOS. **Banco de dados**. São Marcos, 2018.
- CANDIAN, L. M. **Estudo do polietileno de alta densidade reciclado para uso em elementos estruturais**. 2007. 167 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007.
- CANEVAROLO S. V. **Ciência dos Polímeros: um texto básico para tecnólogos e engenheiros**. 2. ed. rev. e amp. São Paulo: Artliber, 2006.
- CHANDRA, M. R., P.; SREENIVASULU S., HUSSAIN S. A. Modeling and Structural analysis of heavy vehicle chassis made of polymeric composite material by three different cross sections. **International Journal of Modern Engineering Research**, Nandyal, v. 2, p. 1-7, jul. 2012.
- DRÖSSLER, R. et al. Tool technology for lightweight structures in 3-d hybrid designs. **Lightweight Design worldwide**, Germany, v. 11, n. 5, p. 42–47, out. 2018.
- FILHO, S. T. A., BLAGA, L. A. **Joining of Polymer–Metal Hybrid Structures: Principles and Applications**. 1. ed. Hoboken: John Wiley & Sons Inc, 2018.
- GHODAKE, A. P.; PATIL, K. N. Analysis of Steel and Composite Leaf Spring for Vehicle. **IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering**, Nashik, v. 5, p. 1-9, jan. 2013.
- GRUJICIC, M. Injection over molding of polymer-metal hybrid structures. **American Journal of Science and Technology**, Clemson, v. 1, n. 4, p. 1-14, ago. 2014.
- HIBBELER, R. C. **Resistência dos Materiais**. 5. ed. São Paulo: Prentice Hall, 2004.
- HYER M. W. **Stress analysis of fiber-reinforced composite materials**. 2. ed. Pennsylvania: DEStech Publications, 2009.
- MANO, E. B.; MENDES, L. C. **Introdução a Polímeros**. 2. ed. São Paulo: Blucher, 1999.
- NETO, F. L.; PARDIN, L. C. **Compósitos Estruturais: ciência e tecnologia**. 2. ed. rev. e amp. São Paulo: Blucher, 2018.

NORTON, R. L. **Projeto de Máquinas**: uma abordagem integrada. 4. ed. Porto Alegre: Bookman, 2004.

RTP COMPANY, Compostos de fibra longa. 2014. Disponível em: <https://www.rtpcompany.com/wp-content/uploads/2014/10/RTP-Co-VLF-Compounds-General-Info-Portuguese.pdf>. Acesso em: 20 mai. 2018.

SATHISHKUMAR, T. P.; SATHEESHKUMAR, S.; NAVEEN, J. **Glass fiber-reinforced polymer composites**: a review. **Journal of Reinforced Plastics and Composites**, Tamilnadu, v. 33, n. 10, p. 3-4, jun. 2014.

SCHUTT, B. P. **Novas aplicações de peças plásticas em substituição às peças metálicas na indústria automotiva**. 2014. 49 f. Monografia (Especialização em Engenharia Automotiva) – Escola de Engenharia Mauá, São Caetano do Sul, 2014.

SILVA, L. C. **Substituição do alumínio pelo compósito de poliamida no suporte do coxim motor**. 2014. 109 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) – Universidade Presbiteriana Mackenzie, São Paulo, 2007.

ÜZÜM, M. **Metal/Polymer Hybrids**: Multiscale Adhesion Behaviour and Polymer Dynamics. 2015. 112f. Dissertação (Doutorado em Ciências) – Universidade Técnica de Berlim, Berlim, 2015.

WONGPAJAN, R. et al. Interfacial shear strength of glass fiber reinforced polymer composites by the modified rule of mixture and kelly-tyson model. **Energy Procedia**, Thailand, v. 89, p. 328–334, jun. 2016.