

UNIVERSIDADE PRESBITERIANA MACKENZIE  
ESCOLA DE ENGENHARIA  
MESTRADO EM ENGENHARIA DE MATERIAIS

LEANDRO CARDOSO DA SILVA

SUBSTITUIÇÃO DO ALUMÍNIO PELO COMPÓSITO DE POLIAMIDA NO SUPORTE  
DO COXIM MOTOR

São Paulo

2014

LEANDRO CARDOSO DA SILVA

SUBSTITUIÇÃO DO ALUMÍNIO PELO COMPÓSITO DE POLIAMIDA NO SUPORTE  
DO COXIM MOTOR

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais da Universidade Presbiteriana Mackenzie, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre Profissional em Engenharia de Materiais.

ORIENTADOR: PROF. DR. ANTÔNIO AUGUSTO COUTO

São Paulo  
2014

S586s

Silva, Leandro Cardoso da

Substituição do alumínio pelo compósito de poliamida no suporte do coxim motor. / Leandro Cardoso da Silva – São Paulo, 2014.

109 f.; 30 cm.

Dissertação (Programa de Pós-Graduação (Stricto Sensu) em Engenharia de Materiais) - Universidade Presbiteriana Mackenzie - São Paulo, 2014.

Orientador: Prof. Dr. Antônio Augusto Couto

Bibliografia: f. 107-109

1. Poliamida 6.6. 2. Coxim motor. 3. Fibra de vidro. 4. Carcaça de alumínio. 5. Staircase. 6. Locati. 7. Fadiga de compósitos poliméricos. I.Título.

CDD 620.11

LEANDRO CARDOSO DA SILVA

SUBSTITUIÇÃO DO ALUMÍNIO PELO COMPÓSITO DE POLIAMIDA NO SUPORTE  
DO COXIM MOTOR

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais da Universidade Presbiteriana Mackenzie, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre Profissional em Engenharia de Materiais.

Aprovado em \_\_\_\_ de \_\_\_\_\_ de 2014.

BANCA EXAMINADORA

---

Prof. Dr. Antonio Augusto Couto  
Universidade Presbiteriana Mackenzie

---

Prof. Dr. Juan Alfredo Guevara Carrió  
Universidade Presbiteriana Mackenzie

---

Prof. Dr. Arnaldo Homobono Paes de Andrade  
Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares - IPEN

A Deus acima de tudo por ter conseguido chegar até aqui.

À minha esposa, minhas filhas e meus pais por todo apoio, paciência e incentivo nesta jornada.

## AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus, por ter me dado a oportunidade de alcançar o meu objetivo.

Ao professor Dr. Antônio Augusto Couto por ter sido orientador e amigo na realização deste trabalho.

À PSA Peugeot Citroën por ter acreditado neste projeto.

Ao Srs. Richard Paiva, Stephane Malle e Fabio Ouchi da PSA Peugeot Citroën responsáveis por me prover à oportunidade de desenvolver uma nova pesquisa com a finalidade de obter o desenvolvimento para avanços tecnológicos na área de materiais.

Ao Sr. Wilton dos Santos da PSA Peugeot Citroën, por ter realizado todas as análises virtuais para validação do conceito do projeto.

Ao Sr. Guilherme Turra da PSA Peugeot Citroën pelas orientações nos cálculos virtuais e principalmente por todo o suporte prestado na compreensão estrutural da proposta.

Aos Srs. Ediney Correa, Adriano Cardoso, Antonio Zanareli, Paulo Dolcinotti, Mateus Gomes e Hans Jürgen Lehniger da Vibracoustic do Brasil por terem me auxiliado nos ensaios físicos e com a confecção dos dispositivos.

Ao Sr. Andre Savoli da Rhodia Poliamida e Especialidades Ltda pelo fornecimento dos dados e pelas amostras fornecidas.

Ao professor Dr. Guilhermino Fachine por toda a orientação sobre os compósitos poliméricos.

Ao professor Dr. Jan Vatauvuk pelas orientações sobre as análises de microscopia eletrônica por varredura.

Ao técnico de laboratório Luiz Henrique Silveira da Universidade Presbiteriana Mackenzie pelo processamento dos corpos de prova.

“No inferno os lugares mais quentes são reservados àqueles que escolheram a neutralidade em tempo de crise.”  
Dante Alighieri

## RESUMO

Os coxins são considerados dentro das classificações automobilísticas como peças estruturais. Geralmente, os coxins utilizam metais como o alumínio e o aço em seus suportes. Esses metais oferecem grande resistência à fadiga e sua degradação na temperatura transmitida pelos motores é muito pequena. Devido à necessidade de diminuir a massa e reduzir o custo, este trabalho teve como objetivo estudar a substituição do suporte de alumínio do coxim do motor pelo compósito de poliamida reforçado com fibra de vidro. O compósito de poliamida é a escolha que melhor oferece o compromisso de um material reciclável, com resistência térmica e à fadiga, devido às suas propriedades mecânicas serem comparáveis às do alumínio. O compósito utilizado foi à poliamida comercial PA 6.6 com 0%, 30%, 35%, 50% de fibra de vidro. Este estudo focará principalmente nas propriedades em fadiga do compósito nas temperaturas de trabalho e nas análises de simulação decorrentes das propriedades obtidas e das condições de utilização do componente. Os ensaios de fadiga do compósito de poliamida com adições de porcentagens variadas de fibra de vidro foram executados em corpos de prova do tipo de flexão a 120°C. O comportamento em fadiga do compósito foi analisado utilizando-se o método staircase. As observações das superfícies de fratura dos corpos de prova ensaiados foram feitas por microscopia eletrônica de varredura e evidenciaram a excelente aderência da poliamida na fibra de vidro. Os resultados obtidos nos ensaios de fadiga, esforços máximos e esforços excepcionais permitiram concluir que o compósito de poliamida com 50% de fibra de vidro apresenta a menor deflexão. A comparação pelo Método de Elementos Finitos do suporte do coxim do motor em compósito de poliamida com reforço de fibra de vidro e da liga de alumínio indicou, de uma maneira geral, resultados similares com relação aos níveis de tensão. Contudo, os valores de deflexão apresentaram valores sistematicamente maiores no compósito. Os resultados dos ensaios mostram um bom comportamento do compósito de poliamida, dando indícios sobre a viabilidade de utilização na substituição da liga de alumínio, com uma redução em massa de 0,2 kg (32%).

Palavras-Chave: Poliamida 6.6. Coxim motor. Fibra de vidro. Carcaça de alumínio. Staircase. Locati. Fadiga de compositos polimericos.



## ABSTRACT

Mounts are considered structural parts. Generally, mounts utilize metals such as aluminum and steel. These metals have high fatigue strength and its degradation temperature transmitted by the engines is very small. This work aimed to study the replacement of the aluminum mounts engine by glass fiber reinforced polyamide composite in order to reduce the mass. Polyamide reinforced with fiberglass is the choice that offers the best compromise of a recyclable material, with adequate thermal and fatigue resistance. The composite used was the commercial polyamide PA66 with 0%, 30%, 35%, 50% glass fiber. This study will focus mainly on the fatigue properties of the composite at temperatures of engine operation. The fatigue tests of the composite with glass fiber additions were performed on flexure specimens at 120°C. The fatigue behavior of the composite was analyzed using the staircase method. The results obtained in fatigue tests showed that the polyamide with 50% glass fiber has the lowest deflection. The observations of the fracture surfaces of the tested specimens were made by Scanning Electron Microscopy (SEM). These observations by SEM showed an excellent adhesion of glass fiber in the polyamide. Analyzes will also be conducted by simulation using the Finite Element Method (FEM) from fatigue results and the conditions of use of the component. The comparison by the FEM of the mounts manufactured of glass fiber reinforced polyamide composite and of aluminum alloy indicated similar results with respect to stress levels. The fatigue tests results and of the simulation by finite element method showed a good possibility of substitution of the aluminum alloy by glass fiber reinforced polyamide composite in the mounts, with a reduction in weight of 0.2 kg (32%).

Key-words: Polyamide 6.6. Engine mount. Fiber glass. Outer part aluminum. Staircase. Locati. Fatigue of polymer composite.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Representação poliamida 6 (nylon-6) e da poliamida 6.6 (nylon 6-6) (FACTORI, 2009).....	25
Figura 2: Curvas de ensaios de tração da PA 6.6 contendo 2,5% de umidade em diversas temperaturas. ....	31
Figura 3: Esquema de determinação da tensão de escoamento. ....	38
Figura 4: Ilustração do método Staircase. ....	40
Figura 5: Ilustração do processo de ensaio de fadiga pelo método Staircase.....	42
Figura 6: Critério de aprovação de esforços máximos. ....	46
Figura 7: Critério de aprovação esforços excepcionais. ....	47
Figura 8: Exemplo de resultados para carregamento excepcional X+ (SILVA ET all, 2012). ....	49
Figura 9: Aparato para execução do ensaio de flexão na temperatura de 120°C. ....	51
Figura 10: Curva carregamento-deflexão do compósito PA 6.6 GF30, PA 6.6 GF35, PA 6.6 GF50 e PA 6.6 sem fibra de vidro. ....	52
Figura 11: Viga em flexão pura: (a) viga com carregamento e (b) curva de deflexão. ....	52
Figura 12: Determinação do valor de deflexão inicial para o ensaio de fadiga do compósito PA 6.6 GF30. ....	54
Figura 13: Determinação do valor de deflexão inicial para o ensaio de fadiga do compósito PA 6.6 GF35. ....	55
Figura 14: Determinação do valor de deflexão inicial para o ensaio de fadiga do compósito PA 6.6 GF50. ....	55
Figura 15: Determinação do valor de deflexão inicial para o ensaio de fadiga da PA 6.6 sem fibra de vidro. ....	56
Figura 16: Corpos de prova ensaiados em fadiga pelo método Staircase. ....	59
Figura 17: Detalhe da fratura no corpo de provas PA 6.6 GF30. ....	59
Figura 18: Detalhe da fratura no corpo de provas PA 6.6 GF35. ....	60
Figura 19: Detalhe da fratura no corpo de provas PA 6.6 GF50. ....	60
Figura 20: Gráfico mostrando os resultados dos ensaios de fadiga pelo método Staircase do compósito PA 6.6 GF30. ....	63
Figura 21: Gráfico mostrando os resultados dos ensaios de fadiga pelo método Staircase do compósito PA 6.6 GF35. ....	63

Figura 22: Gráfico mostrando os resultados dos ensaios de fadiga pelo método Staircase do compósito PA 6.6 GF50. ....	64
Figura 23: Gráfico mostrando os resultados dos ensaios de fadiga pelo método Staircase da poliamida pelo método Staircase PA 6.6.....	64
Figura 24: Curva tensão-deformação PA 6.6 GF30. ....	69
Figura 25: Curva tensão-deformação PA 6.6 GF35. ....	69
Figura 26: Curva tensão-deformação PA 6.6 GF50. ....	70
Figura 27: Curva de simulação referente ao regime plástico conforme inserida no software de elementos finitos (PA 6.6 GF30).....	71
Figura 28: Curva de simulação referente ao regime plástico conforme inserida no software de elementos finitos (PA 6.6 GF35).....	71
Figura 29: Curva de simulação referente ao regime plástico conforme inserida no software de elementos finitos (PA 6.6 GF50).....	72
Figura 30: Esquema de aplicação do carregamento-deflexão $m^*$ no corpo de provas pelo método de elementos finitos. ....	73
Figura 31: Resultado da aplicação do carregamento-deflexão correlato a curva física-virtual (PA 6.6 GF30). ....	73
Figura 32: Resultado da aplicação do carregamento-deflexão correlato a curva física-virtual (PA 6.6 GF35). ....	74
Figura 33: Resultado da aplicação do carregamento-deflexão correlato a curva física-virtual (PA 6.6 GF50). ....	74
Figura 34: Superfície de fratura observada por microscopia eletrônica de varredura do corpo de prova PA 6.6 GF30 fraturado em ensaio de fadiga. ....	76
Figura 35: Superfície de fratura observada por microscopia eletrônica de varredura do corpo de prova PA 6.6 GF35 fraturado em ensaio de fadiga. ....	76
Figura 36: Superfície de fratura observada por microscopia eletrônica de varredura do corpo de prova PA 6.6 GF50 fraturado em ensaio de fadiga. ....	77
Figura 37: Detalhe da superfície de fratura observada por microscopia eletrônica de varredura do corpo de prova do compósito PA 6.6 GF35, mostrando a aderência da poliamida na fibra de vidro. ....	78
Figura 38: Superfície de fratura observada por microscopia eletrônica de varredura do corpo de prova PA 6.6 GF30 fraturado em ensaio de fadiga, evidenciando a zona tracionada e comprimida do corpo de prova. ....	78

Figura 39: Superfície de fratura observada por microscopia eletrônica de varredura do corpo de prova PA 6.6 GF35 fraturado em ensaio de fadiga, evidenciando a zona tracionada e comprimida do corpo de prova. ....	79
Figura 40: Superfície de fratura observada por microscopia eletrônica de varredura do corpo de prova PA 6.6 GF50 fraturado em ensaio de fadiga, evidenciando a zona tracionada e comprimida do corpo de prova. ....	79
Figura 41: Detalhe da superfície de fratura de uma fibra do corpo de prova do compósito PA 6.6 GF30. ....	80
Figura 42: Superfície de fratura observada por microscopia eletrônica de varredura do corpo de prova do compósito PA 6.6 GF30. ....	81
Figura 43: Superfície de fratura observada por microscopia eletrônica de varredura do corpo de prova do compósito PA 6.6 GF50. ....	81
Figura 44: Superfície de fratura observada por microscopia eletrônica de varredura do corpo de prova do compósito PA 6.6 GF35. ....	82
Figura 45: Geometria definida para aplicação do compósito de poliamida em substituição da liga de alumínio. ....	83
Figura 46: Análise por elementos finitos carcaça PA 6.6 (fadiga X+). ....	85
Figura 47: Análise por elementos finitos carcaça PA 6.6 (fadiga X-). ....	85
Figura 48: Análise por elementos finitos carcaça PA 6.6 (fadiga Z+). ....	86
Figura 49: Análise por elementos finitos carcaça PA 6.6 (fadiga Z-). ....	86
Figura 50: Análise por elementos finitos carcaça PA 6.6 (esforços máximos X+). ....	87
Figura 51: Análise por elementos finitos carcaça PA 6.6 (esforços máximos X-). ....	88
Figura 52: Análise por elementos finitos carcaça PA 6.6 (esforços máximos Y+). ....	88
Figura 53: Análise por elementos finitos carcaça PA 6.6 (esforços máximos Z+). ....	89
Figura 54: Análise por elementos finitos carcaça PA 6.6 (esforços máximos Z-). ....	89
Figura 55: Análise por elementos finitos carcaça PA 6.6 (esforços excepcionais X+). ....	90
Figura 56: Análise por elementos finitos carcaça PA 6.6 (esforços excepcionais X-). ....	91
Figura 57: Análise por elementos finitos carcaça PA 6.6 (esforços excepcionais Y+). ....	91
Figura 58: Análise por elementos finitos carcaça PA 6.6 (esforços excepcionais Z+). ....	92
Figura 59: Análise por elementos finitos carcaça PA 6.6 (esforços excepcionais Z-). ....	92
Figura 60: Análise por elementos finitos carcaça SAE 306 (fadiga X+). ....	94
Figura 61: Análise por elementos finitos carcaça SAE 306 (fadiga X-). ....	95
Figura 62: Análise por elementos finitos carcaça SAE 306 (fadiga Z+). ....	95
Figura 63: Análise por elementos finitos carcaça SAE 306 (fadiga Z-). ....	96

Figura 64: Análise por elementos finitos carcaça SAE 306 (esforços máximos X+). .....	97
Figura 65: Análise por elementos finitos carcaça SAE 306 (esforços máximos X-). .....	97
Figura 66: Análise por elementos finitos carcaça SAE 306 (esforços máximos Y+). .....	98
Figura 67: Análise por elementos finitos carcaça SAE 306 (esforços máximos Z+). .....	98
Figura 68: Análise por elementos finitos carcaça SAE 306 (esforços máximos Z-). .....	99
Figura 69: Análise por elementos finitos carcaça SAE 306 (esforços excepcionais X+). .....	100
Figura 70: Análise por elementos finitos carcaça SAE 306 (esforços excepcionais X-). .....	101
Figura 71: Análise por elementos finitos carcaça SAE 306 (esforços excepcionais Y+). .....	101
Figura 72: Análise por elementos finitos carcaça SAE 306 (esforços excepcionais Z+). .....	102
Figura 73: Análise por elementos finitos carcaça SAE 306 (esforços excepcionais Z-). .....	102
Figura 74: Demonstrativo da massa da carcaça do coxim motor de compósito de poliamida. .....	104
Figura 75: Geometria final – carcaça em compósito de poliamida. ....	104

## LISTA DE DESENHOS

Desenho 1: Ilustração do sistema pendular do motor por três pontos de fixação. ....	21
Desenho 2: Dimensionamento do corpo de prova para ensaios de fadiga. ....	37
Desenho 3: Dispositivo de ensaio de ruptura em flexão e de fadiga. ....	37
Desenho 4: Corpo de prova utilizando malha de 2 <sup>a</sup> ordem. ....	44
Desenho 5: Carregamentos utilizados para os cálculos estruturais e direções de aplicação. ...	48
Desenho 6: Carcaça em alumínio injetado mais base plástica em poliamida com 35% de fibra de vidro. ....	48

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Classificação de cargas ou reforços (FACTORI, 2009).....	26
Tabela 2: Principais características da poliamida e compósito de poliamida Technyl e dos compósitos de poliamida com 30, 35 e 50% de fibra de vidro.....	34
Tabela 3: Principais características mecânicas da poliamida e compósito de poliamida Technyl e do compósito de poliamida com 30, 35 e 50% de fibra de vidro. ....	35
Tabela 4: Principais características físicas térmicas da poliamida e compósito de poliamida Technyl e do compósito de poliamida com 30, 35 e 50% de fibra de vidro. ....	35
Tabela 5: Principais características mecânicas a 120°C da poliamida e compósito de poliamida Technyl e do compósito de poliamida com 30, 35 e 50% de fibra de vidro. ...	36
Tabela 6: Principais parâmetros de processo de moldagem das amostras para ensaios de fadiga. ....	36
Tabela 7: Quantidade de corpos de prova e o respectivo estado de aceitação. ....	43
Tabela 8: Valores do carregamento-deflexão utilizados para ensaio método Locati.....	56
Tabela 9: Determinação do valor inicial de deflexão para execução dos ensaios pelo método Staircase (LOCATI) do compósito PA 6.6 GF30. ....	57
Tabela 10: Determinação do valor inicial de deflexão para execução dos ensaios pelo método Staircase (LOCATI) do compósito PA 6.6 GF35. ....	57
Tabela 11: Determinação do valor inicial de deflexão para execução dos ensaios pelo método Staircase (LOCATI) do compósito PA 6.6 GF50. ....	57
Tabela 12: Determinação do valor inicial de deflexão para execução dos ensaios pelo método Staircase (LOCATI) da PA 6.6 sem fibra de vidro. ....	58
Tabela 13: Deflexões iniciais para a execução dos ensaios de fadiga pelo método Staircase. ....	58
Tabela 14: Controle de ensaio PA 6.6 GF50 - Exemplo do ensaio de fadiga pelo método Staircase.....	62
Tabela 15: Média ( $m^*$ ) das deflexões dos ensaios de fadiga pelo método Staircase para a poliamida e para os compósitos.....	65
Tabela 16: Correlação média $m^*$ , força (N) e tensão (MPa).....	66
Tabela 17: Resultados de tensão máxima em fadiga ( $S_{max}$ ) em termos absolutos e em relação ao limite de escoamento ( $\sigma_e$ ) para diferentes níveis de vida e para cada condição dos aços. 4340 e 300M (PIVATO ET all, 2006). ....	67
Tabela 18: Variação da média $m^*$ obtida pelo método Staircase com os valores de deflexão adotados inicialmente nos ensaio de fadiga.....	68

Tabela 19: Tensões limites oriundas dos ensaios experimentais para fadiga, limite elástico e limite de ruptura. ....	75
Tabela 20: Critério de validação para análise de elementos finitos para fadiga, esforços máximos e esforços excepcionais.....	84
Tabela 21: Critério de validação para análise de elementos finitos para fadiga, esforços máximos e esforços excepcionais.....	93



## LISTA DE SÍMBOLOS

PA 6.6	Poliamida.
PA 6.6 GF30	Compósito de poliamida carregado com 30% de fibra de vidro.
PA 6.6 GF35	Compósito de poliamida carregado com 35% de fibra de vidro.
PA 6.6 GF50	Compósito de poliamida carregado com 50% de fibra de vidro.
Tf	Temperatura de fusão.
Tv	Temperatura de transição vítrea.
Rp02	Tensão de escoamento equivalente.
$Fd_0$	Deflexão inicial do Staircase.
$K$	Coefficiente multiplicador de $F_n$ para obter o comportamento médio.
$F_n$	Deflexão de referência.
$Fd_0^*$	Coefficiente multiplicador para deflexão inicial do Staircase.
$L_1^*$	Deflexão inicial mais incremento utilizado a partir do 2º bloco do Locati.
$L^*$	Deflexão inicial do Locati.
$\Delta L^*$	Incremento de 10% sobre a deflexão.
$m^*$	Média dos resultados da deflexão do ensaio de fadiga pelo método Staircase.
Re	Limite elástico.
Rm	Limite de ruptura.
SAE 306	Liga de alumínio.
$\rho$	Raio da curvatura da barra em flexão.
$y$	Distância da superfície inferior até a linha neutra ( $h/2$ ).
$Ex$	Deformação longitudinal na superfície inferior.
$\delta$	Deflexão vertical da barra em flexão.
$\theta$	Ângulo da curvatura.
$M_{máx}$	Momento fletor máximo.
$F$	Força.
$L$	Comprimento.
$\sigma$	Tensão.
$M$	Momento fletor.

$S$	Modulo da seção.
$b$	Base do corpo de prova.
$h$	Altura do corpo de prova.
$\sigma_e$	Tensão de escoamento.
$S_{\max}$	Tensão máxima em fadiga.

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>20</b>
1.1	OBJETIVO .....	21
1.2	JUSTIFICATIVA .....	21
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>23</b>
2.1	SISTEMA PENDULAR DO MOTOR .....	23
2.2	POLIMEROS .....	24
2.3	POLIAMIDA.....	25
2.4	FIBRAS PARA REFORÇO .....	26
2.5	COMPÓSITOS POLIMÉRICOS .....	27
2.6	PROCESSAMENTO DOS COMPÓSITOS POLIMÉRICOS.....	28
2.7	INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA NA POLIAMIDA 6.6.....	30
2.8	FADIGA DOS COMPÓSITOS.....	31
<b>3</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>	<b>33</b>
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>51</b>
4.1	DETERMINAÇÃO DO LIMITE DE FADIGA ATRAVÉS DO CÁLCULO POR ELEMENTOS FINITOS .....	68
4.2	ANÁLISE DE MICROSCOPIA ELETRÔNICA POR VARREDURA.....	75
4.3	CÁLCULO POR ELEMENTOS FINITOS DA CARÇA EM COMPÓSITO DE POLIAMIDA COM FIBRA DE VIDRO.....	82
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES.....</b>	<b>105</b>
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>107</b>

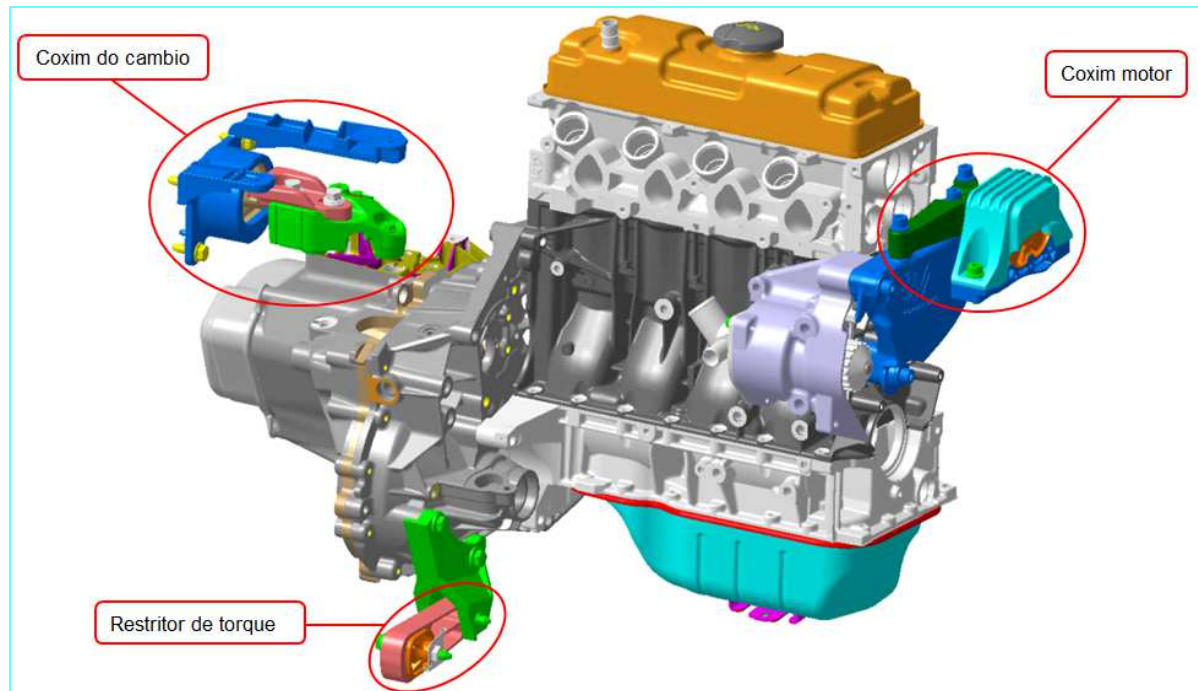
## 1 INTRODUÇÃO

Existe uma busca incessante no mercado automobilístico para reduzir a massa dos veículos para aumentar o desempenho, reduzir custos e ser mais competitivo, sendo assim, novos materiais são desenvolvidos com a intenção de atender essas exigências. Com a necessidade de aumentar a produtividade e racionalizar os custos, a indústria é forçada a buscar novas alternativas para atingir os objetivos e conquistar o mercado. Sendo assim, a substituição de peças metálicas por peças de polímeros será cada vez mais buscada nos novos desenvolvimentos de engenharia aplicados ao mercado automobilístico.

Tradicionalmente os coxins utilizam metais como o alumínio e o aço em seus suportes. Esses metais oferecem grande resistência à fadiga e sua degradação na temperatura transmitida pelos motores é muito pequena. Devido à necessidade de diminuir a massa e reduzir o custo foi estudada a substituição do alumínio pelo compósito de poliamida no suporte do coxim motor.

Dentre as poliamidas existentes destaca-se a 6.6 (PA 6.6) com reforço de fibra de vidro em sua composição. Este compósito, mesmo exposto ao tempo, oferece uma grande resistência mecânica, tem um baixo coeficiente de atrito, altas temperaturas de fusão, boa resistência à fadiga e potencial para tornar-se um material com boa resistência mecânica em temperaturas elevadas (WIEBECK ET all, 2001). As poliamidas, em geral, têm como um grande ponto negativo a degradação sobre temperaturas elevadas já bem estudadas na literatura (WIEBECK ET all, 2001). A substituição do alumínio pelo compósito de poliamida no suporte do coxim do motor foi estudada, devido a suas características oferecerem propriedades estruturais factíveis ao projeto.

O coxim desempenha papéis importantes nos sistema de componentes automobilístico como a sustentação do motor, como elemento filtrante de ruídos e vibrações, como limitador nos deslocamentos do motor e participa da matriz do fluxo de energia e cinemática do motor para resistência em situações de colisão. No desenho 1 pode ser observado o sistema pendular do motor por três pontos de fixação.



Desenho 1: Ilustração do sistema pendular do motor por três pontos de fixação.

## 1.1 OBJETIVO

O objetivo dessa pesquisa é utilizar o compósito de poliamida reforçado com fibra de vidro obtido comercialmente no mercado, com propriedades adequadas para substituir o suporte de alumínio do coxim motor, comparando suas propriedades mecânicas na mesma temperatura de operação do suporte metálico e analisando os resultados principalmente relacionados com os aspectos em fadiga. Outros resultados agregados ao objetivo acima citado são:

- Definir o percentual de fibra de vidro para utilização na formulação do compósito;
- Realizar os ensaios para avaliar a possibilidade de troca do material. Principalmente os ensaios de fadiga em temperaturas elevadas;
- Verificar por meio de método de elementos finitos a substituição de materiais com base nas propriedades determinadas experimentalmente.

## 1.2 JUSTIFICATIVA

O sistema pendular tem como definição funcional suspender e prender o motor na carroceria e isolar as vibrações que são transmitidas do motor para a carroceria, fazendo

com que em diferentes frequências haja o conforto vibratório e servindo também como elemento filtrante para os ruídos (COURTEILLE ET all, 2003).

Os materiais poliméricos são amplamente utilizados devido a algumas características particulares: facilidade de produção, baixo peso e geralmente dúctil. Entretanto, os polímeros apresentam baixa resistência à tração e módulo de elasticidade quando comparados aos materiais cerâmicos e metálicos. Um modo de aumentar essas propriedades é a utilização de materiais de reforço, tais como fibras, esferas ou partículas originando os materiais compósitos poliméricos (JORDAN ET all, 2005).

A escolha do compósito de poliamida com fibra de vidro para o desenvolvimento de uma nova aplicação para suportes do coxim motor ocorre pelas suas vantagens, ou seja, por suas boas propriedades mecânicas, sua alta resistência à fadiga, sua menor densidade e reciclabilidade. Enfim, este compósito oferece características que o qualifica a proposta de substituir o material metálico praticado pelos desenvolvimentos de engenharia neste seguimento (WIEBECK ET all, 2005).

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A seguir será apresentada uma breve revisão bibliográfica sobre os principais tópicos abordados neste trabalho.

### 2.1 SISTEMA PENDULAR DO MOTOR

Os coxins ou apoio do motor do sistema pendular de um veículo são componentes de metal e borracha oriundos do processo de vulcanização. A aderência entre os materiais é promovida por componentes químicos que através das definições de processo de tempo, temperatura e pressão permitem reações originadas na adesão entre os materiais.

O sistema pendular do motor tem como principal objetivo isolar as vibrações geradas pelo motor e absorve-las ao máximo, servindo também como elemento filtrante, não permitindo a transmissão da vibração para carroceria do automóvel. Os sistemas de apoio do motor com o passar dos anos tem apresentado evoluções na função de isolamento de ruídos e vibrações geradas pelo motor. Segundo YUNHE ET all (2001), o sistema de apoio do motor ainda necessita de melhoria devido a dois fatores. O primeiro fator trata do nível requerido de isolamento de ruído e vibração para os passageiros do automóvel. O competitivo mercado automotivo e a necessidade da satisfação do cliente levam estes requisitos a níveis cada vez mais precisos, implicando em mais pesquisas e desenvolvimentos nesta área. O segundo fator, discute que os projetos atuais tendem para uma carroceria mais leve com motores mais potentes. Os requisitos de redução de peso e o aumento de potência exercem efeitos adversos sobre o comportamento vibratório, causando grande impacto sobre os níveis de vibração e ruído. Estes dois aspetos estão sempre em conflito. A busca da melhoria no desempenho do sistema de apoio do motor tem como objetivo solucionar tais problemas.

Os coxins se diferem em várias modalidades técnicas, nas quais se buscam o compromisso de interesse entre a prestação de filtração de ruído e vibração desejada para as exigências do projeto. Como exemplos, temos os coxins convencionais, coxins hidráulicos, coxins semi-ativos e coxins ativos.

De acordo com OLIVEIRA (2011), os coxins convencionais são projetados para terem características de relação de rigidez estática necessária em todas as direções para o isolamento de vibração adequada. Eles são compactos, baratos e de manutenção simples.

Os coxins hidráulicos por terem como definição industrial a membrana hidráulica em seu conceito de projeto, este componente faz o ajuste do fluido existente de

acordo com a frequência de trabalho, ou seja, permite uma melhor resposta em rigidez dinâmica para baixas e altas frequências. A não utilização da membrana no conceito do projeto de um coxim hidráulico, em linhas gerais, pode ocasionar uma degradação importante no desempenho da filtração de ruídos de vibrações em altas frequências.

Os coxins semi-ativos geralmente são construídos de forma que seja possível controlar parâmetros como rigidez elástica e amortecimento. Um exemplo típico desse controle é a injeção de fluido internamente ao coxim, modificando a pressão interna, além de alterar também a restrição dos orifícios e a frequência de ressonância do sistema.

Os coxins ativos tem em sua concepção o controle ativo vibracional, onde uma força dinâmica neutralizadora é criada por um ou mais atuadores de forma a suprimir a transmissão da força perturbadora ao sistema. Um típico coxim ativo consiste em um coxim passivo (elastomérico ou hidráulico), atuador de força, um sensor de vibração estrutural e um controlador eletrônico. O atuador trabalha de forma a gerar a força dinâmica, com magnitude e resposta rápida o suficiente para controlar o sistema dinamicamente. O sensor de vibração, geralmente é um sensor de força ou acelerômetro, que promove o controle da entrada necessária para que o mesmo ajuste a força (amplitude e fase) do atuador a fim de se obter a resposta desejada.

## 2.2 POLIMEROS

De acordo com CANEVAROLO (2002) a palavra polímero origina-se do grego poli (muitos) e mero (unidade de repetição), logo um polímero é uma macromolécula composta por muitas unidades de repetição denominadas meros, ligadas por ligação covalente. A matéria-prima para a produção de um polímero é chamada de monômero. Trata-se de uma molécula com uma unidade de repetição. De acordo com a estrutura química do monômero podemos dividir os polímeros em três classes: plásticos, borrachas e fibras.

Os plásticos podem ser divididos em termoplásticos e termofixos, de forma que em suas respectivas definições, termoplásticos são aqueles com capacidade de amolecer e fluir quando submetidos a um aumento de temperatura e pressão e os termofixos são os que amolecem uma vez com o aquecimento, sofrem o processo de cura no qual se tem uma transformação química irreversível, com a formação de ligações cruzadas, tornando-se rígido.



### 2.3 POLIAMIDA

Devido a sua excelente resistência mecânica e ao envelhecimento natural, baixo coeficiente de atrito, alta temperatura de fusão, boa resistência a impacto e sua alta resistência à fadiga, a poliamida está entre os plásticos de engenharia que mais se destacam. Por outro lado, as poliamidas são sensíveis ao entalhe, ou seja, sua ductilidade é alta quando não entalhados, mas fraturam de maneira frágil quando entalhados.

Em 1940 a DuPont iniciou a produção comercial para aplicação de fibras têxteis e em 1941 produzia-se plásticos por moldagem, porém se popularizou em 1950 (WIEBECK ET all, 2005). A poliamida 6.6 é obtida a partir de um ácido dicarboxílico, o ácido hexanodióico (ácido adípico), que possui seis átomos de carbono e uma diamina, o hexano-1,6-diamina (hexametileno diamina), que também possui seis átomos de carbono, conforme representação na figura 1. O aquecimento da mistura dos dois compostos leva a eliminação de uma molécula de água entre um grupo amina e um grupo carboxílico e a formação de uma amida. A reação se repete um grande número de vezes formando um polímero de cadeia longa que pode ser utilizado em inúmeros processos de fabricação. Pode-se fiá-la para obtenção de fibras que serão empregadas na produção de carpetes ou ainda moldá-la para a obtenção de peças rígidas que serão utilizadas como engrenagens diversas ou ainda em peças para a indústria automobilística (FACTORI, 2009).

A poliamida 6.6 resulta da policondensação do hexametilenodiamina e ácido adípico, que libera duas moléculas de água para uma de sal de nylon (MOLLARD, 1997).

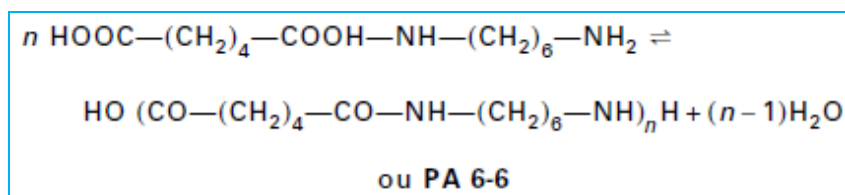


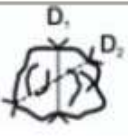

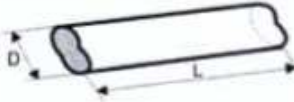

Figura 1: Representação poliamida 6 (nylon-6) e da poliamida 6.6 (nylon 6-6) (FACTORI, 2009).

A umidade tem grande importância para poliamida. A resistência mecânica das poliamidas varia com o teor de umidade, bem como com a velocidade de solitação imposta. A velocidade de impacto deve ser grande para provocar sua ruptura. Os ensaios clássicos de tração, compressão, flexão e cisalhamento são realizados geralmente a velocidade média, no estado seco e no estado úmido (GUÉRIN, 1994; CHATAIN, 1993).

## 2.4 FIBRAS PARA REFORÇO

Chama-se carga ou reforço todo componente insolúvel que quando é adicionado ao polímero modifica uma ou mais propriedades do polímero puro. Estes reforços são frequentemente classificados segundo sua forma: grãos ou esferas, lamelas, agulhas ou fibras (FACTORI, 2009), conforme mostrado na Tabela 1.

Tabela 1: Classificação de cargas ou reforços (FACTORI, 2009).

Natureza	Geometria	Razão de forma	Exemplos
Granular ou esférica		$\frac{D_1}{D_2} = 1$	Esfera de vidro $C_aCO_3$ Negro de fumo
Lamelar		$\frac{D}{e} = 10 \text{ à } 40$	Talco Mica
Acicular ("agulhas")		$\frac{L}{D} = 10 \text{ à } 100$	Fibras curtas ( $L < 2 \text{ mm}$ ) Wollastonita
Fibrilar		$\frac{L}{D} > 100$	Fibras longas ( $L > 2 \text{ mm}$ ) Fibra de vidro, Kevlar

De acordo com CANEVAROLO (2002), a distribuição de esforços ou tensão em uma matriz polimérica é uniforme em todos os seus pontos. A presença de uma segunda fase dispersa nessa matriz também sofrerá a solicitação aplicada no conjunto. Se o módulo de elasticidade desta segunda fase for mais alto que a matriz, o resultado final será um aumento no módulo de elasticidade e na resistência ao escoamento e à ruptura do composto. Este efeito é conhecido como reforço por adição de fibras e é muito utilizado comercialmente para melhorar o desempenho mecânico de polímeros e permitir sua utilização em aplicações nas quais o polímero puro correria grande risco de falhar. Uma vez que a forma fibrosa de um material possui elevada resistência à tração e alto módulo de elasticidade, este tipo de material é usado atualmente como material de engenharia em combinação com uma matriz que, além

de envolver e proteger a fibra deforma sob a ação de uma força e lhe distribui a tensão, impedindo a propagação de falhas (SANTOS, 2006).

As primeiras ideias sobre a produção de fios de fibra de vidro surgiram no início do século XIX. No entanto, foi só a partir de 1939 que elas começaram a ser comercializadas, destinando-se principalmente à fabricação de produtos para isolamento térmica e como reforço em materiais compósitos. Os vidros são substâncias que se solidificam no estado amorfo. São obtidos da fusão de óxidos ou seus derivados, principalmente a sílica ( $\text{SiO}_2$ ), com outros ingredientes, a uma temperatura de aproximadamente  $1.260^\circ\text{C}$ .

Na constituição de materiais compósitos de matriz polimérica (termorrígida ou termoplástica), as fibras de vidro são, atualmente, os reforços mais utilizados. O baixo custo em comparação com outros reforços não é certamente o único motivo deste sucesso, uma vez que suas propriedades atendem a uma grande variedade de aplicações. Os materiais compósitos constituídos por fibras de vidro possuem baixo coeficiente de dilatação térmica, boa resistência ao impacto, alta resistência à tração e uma notável flexibilidade de conformação e, em determinados casos, de manutenção (WIEBECK ET all, 2005).

É fato que as propriedades mecânicas das fibras de vidro de reforço originam o desenvolvimento de muitos compósitos em todos os campos industriais. O vidro é um símbolo de fragilidade, porém associado às formulações de compósitos pode oferecer uma de resistência estrutural superior a de alguns aços (BERTHEREAU ET all, 2008).

Os produtos que utilizam fibras em sua composição têm a função de aumentar o módulo de elasticidade e a tensão de ruptura. O princípio de inserção de fibras vem de possíveis esforços que o material possa sofrer na sua aplicação. As fibras são colocadas no sentido do esforço aplicado, principalmente tração (LUCAS ET all, 2007).

## 2.5 COMPÓSITOS POLIMÉRICOS

O termo material compósito significa que dois ou mais materiais que estão combinados em uma escala macroscópica resultam um terceiro material com propriedades melhoradas. Os materiais diferentes podem ser combinados em uma escala microscópica, como numa liga metálica, mas o material resultante é, para todos os efeitos, macroscopicamente homogêneo. Neste caso, os componentes não podem ser distinguidos a olho nu e essencialmente deverão atuar juntos. A vantagem de materiais compósitos é que, se bem desenvolvidos, exibem geralmente melhores propriedades do que seus componentes e,

frequentemente, alguma propriedade que nenhum outro componente possui. Algumas das propriedades que podem ser melhoradas com a formação de um material composto são:

- Rigidez;
- Resistência de corrosão;
- Resistência de desgaste;
- Resistência à Tração;
- Vida em fadiga;
- Comportamento mecânico em temperatura elevada;
- Isolação térmica;
- Isolação acústica;

Naturalmente, todas estas propriedades não são melhoradas ao mesmo tempo, nem há geralmente todas estas exigências. De fato, algumas das propriedades entram em conflito umas com as outras, como por exemplo, isolamento térmica contra a condutibilidade térmica. O objetivo principal do compósito é criar um material que tenha somente as características necessárias para executar as tarefas dos projetos (JONES, 1998).

## 2.6 PROCESSAMENTO DOS COMPÓSITOS POLIMÉRICOS

O processamento da poliamida com fibra de vidro requer cuidado especial devido aos seguintes fatores:

- Natureza higroscópica da resina;
- Alta temperatura de fusão cristalina e baixa viscosidade na temperatura de processamento;
- Tendência à oxidação a temperaturas elevadas de processamento;
- Alto grau de cristalinidade e, conseqüentemente, grande encolhimento no resfriamento.

Estas características requerem cuidados especiais por parte dos processadores, como estufagem prévia dos grânulos a temperaturas entre 70 e 90°C. As injetoras devem ser projetadas para evitar "pontos mortos" no fluxo do polímero fundido que levam à oxidação do material. Devido à baixa viscosidade, os bicos das injetoras devem apresentar sistemas de bloqueio para evitar vazamentos. Além disso, altas pressões de empacotamento devem ser

mantidas para minimizar o efeito do alto grau de contração do polímero no resfriamento, ou seja, para compensar as perdas volumétricas.

As temperaturas do molde e os tempos de resfriamento nos ciclos de moldagem das poliamidas são críticos, visto que o grau de cristalinidade depende da taxa de resfriamento. Para reduzir os ciclos de resfriamento e ao mesmo tempo atingir alta cristalinidade nos moldados, as resinas PA 6 e PA 6.6 são fornecidas com agentes de nucleação que precipitam rapidamente um maior número de esferulitos de dimensões menores e de características morfológicas superiores, resultando em melhores propriedades de resistência nos produtos acabados. Existem vários tipos de agentes de nucleação empregados, geralmente em pequenas porcentagens (< 1%), tais como: sílica fina precipitada, poliamidas de alta massa molar ou com ligações cruzadas e outros polímeros de temperatura de fusão superior e textura granulométrica mais fina. Geralmente, os agentes nucleantes tais como poliamidas de ligações cruzadas ou alta massa molar, melhoram substancialmente as propriedades físicas e mecânicas do produto final (WIEBECK ET all, 2005).

As propriedades de um compósito reforçado com fibras não dependem somente das propriedades das fases, mas também da capacidade pela qual uma carga aplicada é transmitida da matriz para as fibras. A força de ligação interfacial é um fator importante para a eficácia dessa transmissão de carga. A transmissão de carga da matriz para a fibra gera um padrão de deformação na matriz devido às diferenças acentuadas das propriedades mecânicas das fases. O diâmetro da fibra, em alguns termoplásticos, tem influência na resistência à tração e ao impacto. Os compósitos poliméricos em geral são sensíveis à variação do diâmetro da fibra, onde tanto a resistência à tração quanto a resistência ao impacto diminuem com o aumento do diâmetro da fibra. O arranjo ou orientação das fibras umas em relação às outras, a concentração e sua distribuição, geram influências significativas na resistência e em outras propriedades dos compósitos reforçados por fibras. Com relação à orientação das fibras, duas situações extremas são possíveis: a primeira, quando orientadas paralelamente ao eixo longitudinal das fibras, e a segunda, quando totalmente aleatório. Normalmente as fibras contínuas são alinhadas, enquanto as fibras curtas podem estar alinhadas, orientadas aleatoriamente ou parcialmente orientadas. De maneira geral, as melhores propriedades dos compósitos são alcançadas quando a distribuição das fibras é uniforme (DAMIANI, 2013).

A orientação das fibras no processo de fabricação dá-se através de estudos computacionais e projetos avançados em ferramentas de injeção. A análise computacional inicialmente permite simular o processo de moldagem por injeção, prevendo o comportamento do fluxo do compósito polimérico, permitindo aos utilizadores atingir maiores

níveis de qualidade, estudos da fluência das fibras de acordo com os pontos de injeção e resultados mais rentáveis, não só para o componente, como também para as ferramentas de injeção. Este estudo computacional acaba servindo como base de projeto para a definição final do projeto da ferramenta de injeção.

Após serem injetadas, as peças devem ser hidratadas para que possam adquirir todas as propriedades características do nylon. O tempo de hidratação será determinado pelas dimensões da peça e pela temperatura da água. Na literatura é recomendada a imersão em banhos de ambiente não oxidante, tais como ceras e óleos lubrificantes, a temperaturas entre  $T_f$  e  $T_v$  do polímero. No entanto, o custo elevado e a dificuldade de limpeza das peças fazem com que as indústrias optem pela hidratação em banho de água quente (WIEBECK ET all, 2005).

## 2.7 INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA NA POLIAMIDA 6.6

As poliamidas amorfas não podem ser utilizadas em solicitações dinâmicas em temperaturas superiores a temperatura de transição vítrea. A sua rigidez é elevada e as deformações ocorrem em função dos esforços aplicados. O seu módulo de elasticidade diminui muito rápido para as temperaturas mais elevadas. No caso das poliamidas cristalinas, além da transição vítrea, o módulo de elasticidade diminui lentamente até a temperatura de fusão. Na figura 2 são mostrados gráficos de ensaio de tração da poliamida 6.6 para diversas temperaturas. Nota-se o efeito da temperatura nas propriedades em tração deste material. A adição de fibras aumenta a resistência mecânica do compósito, mas torna-o mais frágil (GUÉRIN, 1994).

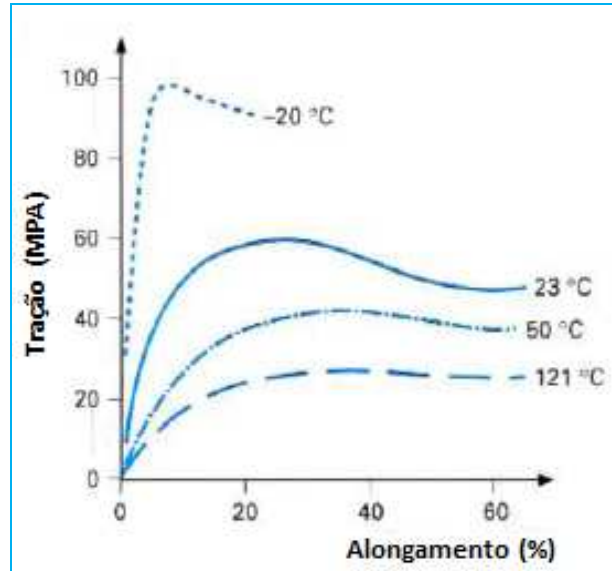


Figura 2: Curvas de ensaios de tração da PA 6.6 contendo 2,5% de umidade em diversas temperaturas.

## 2.8 FADIGA DOS COMPÓSITOS

Fadiga é uma forma de falha que ocorre em estruturas que estão sujeitas a tensões dinâmicas e oscilantes, tais como pontes, aeronaves e componentes de máquinas. Sob essas circunstâncias, é possível que uma falha ocorra em um nível de tensão consideravelmente menor do que o limite de resistência à tração ou o limite de escoamento para uma carga estática. O termo “fadiga” é usado, porque esse tipo de falha ocorre normalmente após um longo período de tensões repetidas ou ciclos de deformação. A fadiga é importante no sentido em que ela é a maior causa individual de falhas nos metais, representando aproximadamente 90% de todas as falhas de metais. Os polímeros e os cerâmicos (à exceção dos vidros) também são suscetíveis a esse tipo de falha. Além disso, a fadiga é catastrófica e inesperada, ocorrendo muito repentinamente sem qualquer aviso prévio.

Mesmo nos metais normalmente dúcteis, a falha por fadiga é de natureza frágil, existindo muito pouca, ou nenhuma, deformação plástica generalizada associada à falha. O processo ocorre pela iniciação e a propagação de trincas, e em geral a superfície da fratura é perpendicular à direção de uma tensão de tração aplicada (CALLISTER, 2008).

A combinação de baixa massa específica com valores elevados de resistência e rigidez, que os compósitos poliméricos avançados proporcionam, permite que essa classe de materiais seja empregada nas indústrias aeronáutica e espacial em substituição aos materiais metálicos tradicionais. Componentes estruturais de aeronaves para fins civil e militar, tais como: flapes, leme, carenagens, empenagens, aileron, tanques de combustível, profundor e cone de cauda, entre outros, que anteriormente eram fabricados em ligas de alumínio, titânio e aços especiais, vem sendo hoje fabricados, na sua grande maioria, em estruturas de compósitos poliméricos avançados (FARIA ET all, 2007).

Fadiga nos materiais plásticos assim como em outros materiais de engenharia estão sujeitos à tração, à compressão, ou ambos, em esforços cíclicos que por conta da oscilação da tensão diante do tempo (FREIRE, 2001). Nestas circunstâncias é sabido que a falha de fadiga é oriunda das cargas cíclicas de tração e compressão combinadas, que na maioria dos casos são muito severas (DUPONT, 2005).

Estruturas de compósitos em serviço são geralmente submetidas a cargas de fadiga. A fadiga em compósitos reforçados com fibras contínuas consiste em um fenômeno muito complexo. Devido à degradação das propriedades durante o carregamento cíclico, as tensões são continuamente redistribuídas na estrutura do compósito. Portanto, o comportamento em fadiga para este material ocorre de forma diferente quando comparado aos materiais metálicos. Nos materiais compósitos, geralmente, este processo inicia-se a partir da formação de microfissuras na matriz, logo nos primeiros ciclos. Entretanto, estes materiais podem suportar cargas até que a fratura do reforço ocorra. Desta forma, durante a realização dos ensaios de fadiga, podem acumular-se muitos danos sem que sejam visualmente evidentes fissuras macroscópicas, podendo, no entanto, registrar significativas perdas na rigidez e na tensão de ruptura (OLIVEIRA ET all, 2007).

As poliamidas têm boas propriedades de durabilidade em fadiga que podem estar atreladas a incorporações de cargas de reforço. As poliamidas tem um fraco coeficiente de atrito em contato com muitos materiais. Caso seja necessário, é possível incorporar cargas autolubrificantes para melhoria das condições impostas (GUÉRIN, 1994; KRAWCZAK, 2000).



### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste estudo foram utilizados os compósitos de poliamida fornecidos em grãos com percentual de fibra de vidro de 30, 35 e 50% e sem a fibra de vidro, respectivamente denominadas como PA 6.6 GF30, PA 6.6 GF35, PA 6.6 GF50 e PA 6.6 0% fibra de vidro. Os processamentos dos corpos de prova foram feitos no laboratório de materiais da Universidade Presbiteriana Mackenzie. Os cálculos estruturais foram realizados na PSA Peugeot Citroën e os ensaios de fadiga foram realizados no laboratório da empresa Vibracoustic do Brasil.

O compósito de poliamida e a poliamida utilizada foram a 6.6, pertencente à família comercial chamada Technyl (RHODIA, 1998; RHODIA, 2002; RHODIA, 2009; RHODIA, 2010). A tabela 2 descreve a especificação de todos os materiais estudados: poliamida, compósito de poliamida e fibra de vidro. A fibra de vidro contida na formulação dos compositivos de poliamida é classificada como curta, tendo seu comprimento de 4,5 mm com diâmetro de 10 $\mu$ .

As características impactantes que atuam de forma positiva para análise da substituição do material metálico pelo compósito de poliamida com fibra vidro são as ligadas às propriedades mecânicas e térmicas, não deixando de ser importante relacionar outras características como comportamento ao fogo e elétrica. Na tabela 3 são apresentadas as principais características mecânicas de todos os materiais estudados: poliamida e compósito de poliamida e fibra de vidro (RHODIA, 1998; RHODIA, 2002; RHODIA, 2009; RHODIA, 2010). Na tabela 4 são apresentadas as principais características físicas e térmicas de todos os materiais estudados: poliamida e compósito de poliamida e fibra de vidro. Na tabela 5 são apresentadas as principais características mecânicas a 120°C de todos os materiais estudados: poliamida e compósito de poliamida e fibra de vidro. A temperatura utilizada foi de 120°C em função de ser a máxima temperatura de trabalho do coxim motor em situação dinâmica.

Tabela 2: Principais características da poliamida e compósito de poliamida Technyl e dos compósitos de poliamida com 30, 35 e 50% de fibra de vidro.

PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS DA POLIAMIDA/COMPOSITO DE POLIAMIDA				
	PA 6.6	PA 6.6 GF 30	PA 6.6 GF 35	PA 6.6 GF 50
<b>Descrição</b>	Technyl A 216	Technyl A 218 V30	Technyl A 218 V35	Technyl A 118 V50
<b>Propriedades principais</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Resistência mecânica</li> <li>Resistência a abrasão</li> <li>Estabilidade térmica</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Resistência mecânica elevada</li> <li>Estabilidade dimensional</li> <li>Estabilidade térmica</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Resistência mecânica elevada</li> <li>Estabilidade dimensional</li> <li>Estabilidade térmica</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Resistência mecânica elevada</li> <li>Estabilidade dimensional</li> <li>Estabilidade térmica</li> </ul>
<b>Moldagem</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Temperatura do cilindro: zona de alimentação : 270 - 275 °C</li> <li>zona de compressão : 280 - 285 °C</li> <li>zona de homogeneização: 270 - 290 °C</li> <li>bico : 285 - 290 °C</li> <li>Temperatura do molde: 60 - 80 °C</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Temperatura do cilindro: zona de alimentação : 250 - 270 °C</li> <li>zona de compressão : 260 - 280 °C</li> <li>zona de homogeneização: 270 - 290 °C</li> <li>bico : 260 - 280 °C</li> <li>Temperatura do molde: 60 - 80 °C</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Temperatura do cilindro: zona de alimentação: 250° - 270° C</li> <li>zona de compressão: 260° - 280°C</li> <li>zona de homogeneização: 270° - 290°C</li> <li>bico: 260° - 280°C</li> <li>Temperatura do molde: 60° - 80°C</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Temperatura do cilindro: zona alimentação: 260°C - 270°C</li> <li>zona compressão: 270°C - 280°C</li> <li>zona homogeneização: 280°C - 290°C</li> <li>bico: 280°C - 290°C</li> <li>Temperatura do molde: 80 - 100°C</li> </ul>
<b>Aplicações</b>	Utilizado em uma variedade de indústrias, incluindo ferramentas industriais, quadro de filtro de combustível para automóveis, aparelhos domésticos, prendedores, caixas, garrafa, etc	Utilizado nas mais variadas aplicações dentro das indústrias automobilística, eletro-eletrônica e eletrodomésticos	Utilizado nas mais variadas aplicações dentro das indústrias automobilística, eletro-eletrônica e eletrodomésticos	Próprio para a fabricação de peças onde elevada resistência mecânica e térmica são necessárias, como nas peças para o setor automobilístico usadas no compartimento do motor

Tabela 3: Principais características mecânicas da poliamida e compósito de poliamida Technyl e do compósito de poliamida com 30, 35 e 50% de fibra de vidro.

PRINCIPAIS CARATERISTICAS MECÂNICAS					
Propriedades		PA 6.6	PA 6.6 GF 30	PA 6.6 GF 35	PA 6.6 GF 50
TRAÇÃO	Módulo de elasticidade (MPa)	3000	9500	11200	13000
	Resistência à ruptura (MPa)	81	180	190	220
	Alongamento na ruptura (%)	4,2	3,5	3	1,8
FLEXÃO	Módulo de elasticidade (MPa)	2900	8000	-	15500
	Resistência sob carga máxima (MPa)	120	270	-	355
RESISTÊNCIA AO IMPACTO	Izod entalhado (KJ/m <sup>2</sup> )	4	9	14	14

Tabela 4: Principais características físicas térmicas da poliamida e compósito de poliamida Technyl e do compósito de poliamida com 30, 35 e 50% de fibra de vidro.

PRINCIPAIS CARATERISTICAS FISICAS TERMICAS				
Propriedades	PA 6.6	PA 6.6 GF 30	PA 6.6 GF 35	PA 6.6 GF 50
Peso específico (kg/m <sup>3</sup> )	1140	1350	1410	1570
Absorção de água (%) - 24h a 23 °C	1,3	0,55	0,75	0,6
Ponto de fusão (°C)	263	260	255	255
Temperatura de deformação sob carga à 1,8 MPa (°C)	75	-	255	>240

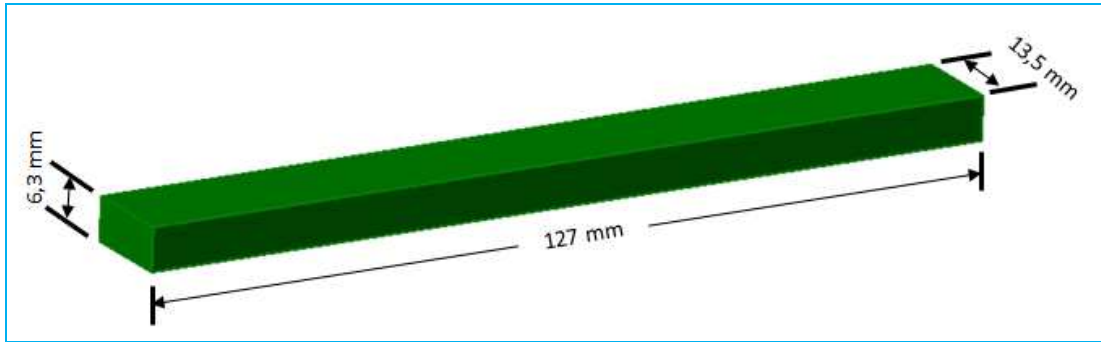
Tabela 5: Principais características mecânicas a 120°C da poliamida e compósito de poliamida Technyl e do compósito de poliamida com 30, 35 e 50% de fibra de vidro.

120°C				
Propriedades	0% GF	30% GF	35% GF	50% GF
<b>Tração - ISO 527</b>				
Tensão na Força Máxima (MPa)	25,99	71,08	96,30	128,00
Deformação Esp. Força Máxima (%)	6,70	6,60	6,80	4,70
Tensão na Ruptura (MPa)	21,20	70,41	97,50	119,00
Deformação Esp. Ruptura (%)	6,20	7,30	7,10	5,60
Módulo de Elasticidade (MPa)	554,20	3998,00	4839,00	7541,00

A injeção dos corpos de prova do tipo de flexão para a realização dos ensaios de fadiga foi realizada em máquina injetora Romi 65R com capacidade de pressão de 175 bar à temperatura ambiente com os principais parâmetros de processo para moldagem conforme mostrado na tabela 6. Foram injetados corpos de prova nas dimensões 127 x 13,5 x 6,3 mm, conforme mostrado no desenho 2.

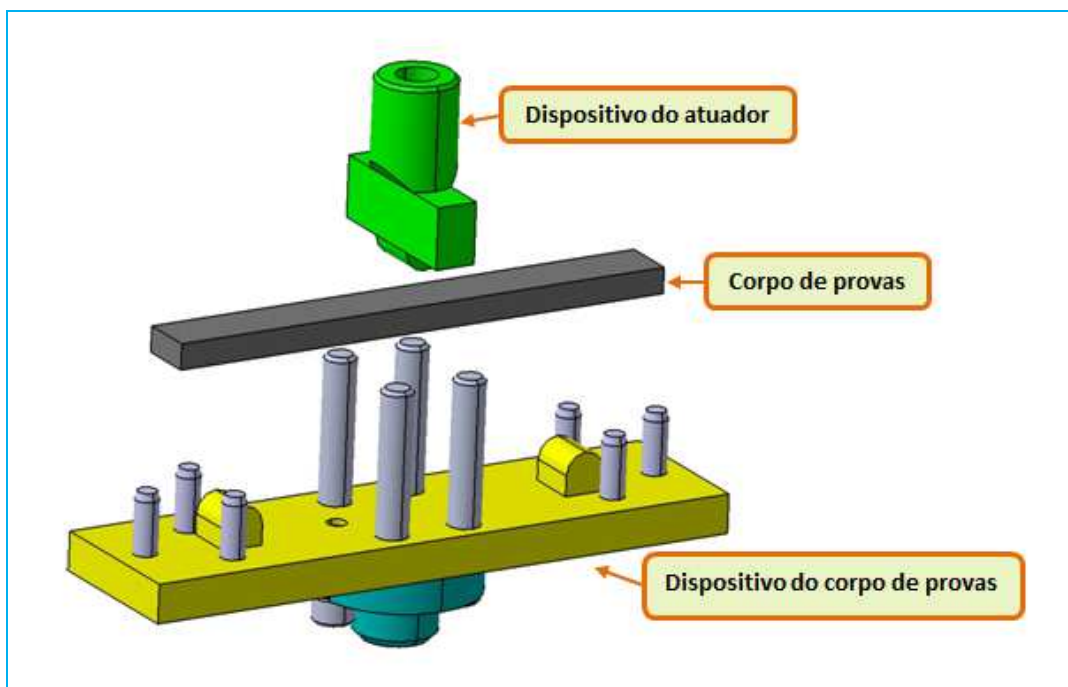
Tabela 6: Principais parâmetros de processo de moldagem das amostras para ensaios de fadiga.

PRINCIPAIS PARÂMETROS DE PROCESSO PARA MOLDAGEM				
Propriedades	PA 6.6	PA 6.6 GF 30	PA 6.6 GF 35	PA 6.6 GF 50
Zona de alimentação (°C)	270	270	270	270
Zona de compressão (°C)	280	280	280	280
Zona de homogenização (°C)	302	302	302	302
Bico (°C)	290	280	280	320
Temperatura do molde (°C)	50	50	50	75



Desenho 2: Dimensionamento do corpo de prova para ensaios de fadiga.

O ensaio estático de ruptura em flexão para determinação do carregamento que será utilizado nos ensaios de fadiga foi realizado em uma máquina MTS 810 Shock Absorber Test System Software Test Star II com uma célula de carga com capacidade para 15 KN e uma estufa Coel com capacidade máxima de aplicar temperatura de até 200°C. O dispositivo de ensaio estático de ruptura em flexão para determinação do carregamento e posterior ensaio de fadiga é mostrado no desenho 3, segundo a norma ASTM D 790. Os ensaios foram realizados com velocidade de 20 mm/min a uma temperatura de 120 °C.



Desenho 3: Dispositivo de ensaio de ruptura em flexão e de fadiga.

O objetivo do ensaio de ruptura em flexão é a obtenção do valor inicial de carga para o estudo de fadiga pelo método Staircase. Essa carga inicial foi definida como um

percentual da tensão de escoamento do material. Desta forma será utilizado o mesmo método dos ensaios de tração para as curvas extraídas do ensaio de ruptura em flexão na determinação das (tensões) iniciais ou de referência para os corpos de prova com seus respectivos percentuais de fibra de vidro, conforme apresentado na figura 3.

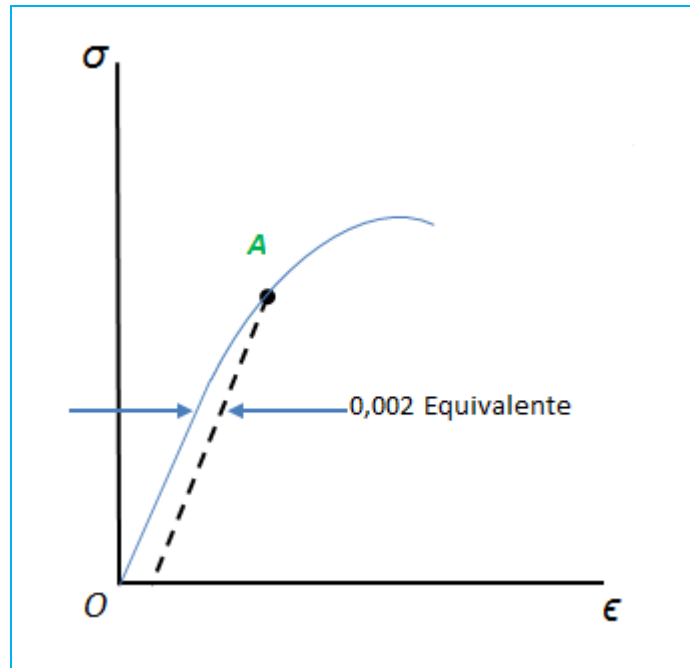


Figura 3: Esquema de determinação da tensão de escoamento.

Quando um material como o alumínio não tem um ponto de escoamento obvio e ainda sofre grandes deformações depois que o limite de proporcionalidade é excedido, uma tensão de escoamento arbitrária pode ser determinada pelo método de equivalência. Uma linha é traçada no diagrama de tensão-deformação paralela à porção linear inicial da curva (Figura 3), mas deslocada de alguma deformação padrão, tal como 0,002 (ou 0,2%). A interseção da linha de equivalência com a curva de tensão-deformação (ponto A na figura) define a tensão de escoamento. Como essa tensão é determinada por uma regra arbitrária e não é uma propriedade física inerente do material, deve ser distinguida da tensão de escoamento verdadeira referindo-se a ela como tensão de escoamento equivalente. Para um material como o alumínio, a tensão de escoamento está ligeiramente acima do limite de proporcionalidade. No caso do aço estrutural, com sua transição abrupta da região linear para a região de estiramento plástico, a tensão equivalente é essencialmente a mesma que a tensão de escoamento e a tensão limite de proporcionalidade (GERE, 2003). Desta forma utilizaremos o mesmo método chamado de Rp02 para as curvas extraídas do ensaio de ruptura

para que assim possam ser determinados os deslocamentos iniciais ou de referência  $F_n$  para os corpos de provas com seus respectivos percentuais de fibra de vidro.

O ensaio de fadiga foi realizado em uma máquina MTS 810 Shock Absorber Test System Software Test Star II com uma célula de carga com capacidade para 15 kN e uma estufa Coel com capacidade máxima de aplicar temperatura de até 200°C. O ensaio de fadiga pelo método Staircase utilizou o mesmo dispositivo onde foi realizado o ensaio de ruptura para obtenção do carregamento inicial, obedecendo aos padrões de ensaio conforme norma PSA B32 0730, sob temperatura de 120°C a uma frequência de 25 Hz. O método Staircase determina a média e a variância da resistência à fadiga em alguma vida específica, determinando, conseqüentemente, o limite de resistência à fadiga para uma vida infinita. Neste método, o corpo de prova é inicialmente ensaiado com uma tensão alternada determinada, observando-se então, se o mesmo falhará ou atingirá a vida útil de interesse (LOPES, 2006). A figura 4 ilustra o método Staircase ou método da escada. De acordo com a norma PSA B32 0730, o processo para realização do Staircase deve ser separado em duas fases. A primeira chamada de Fase Preliminar ou Locati, onde se determina o nível de carregamento inicial para o Staircase e a segunda fase, chamada de Principal, onde se aplica o método Staircase.

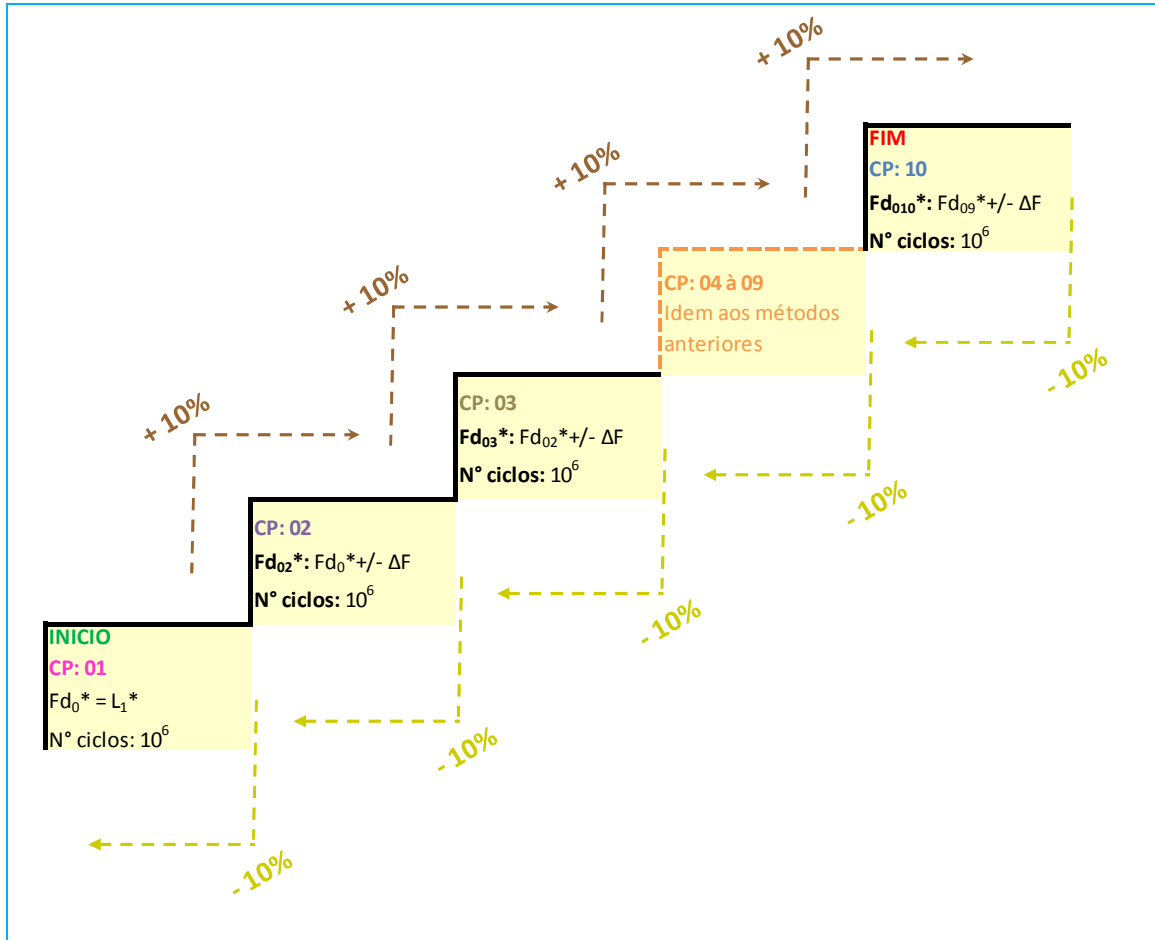


Figura 4: Ilustração do método Staircase.

Na fase preliminar para determinação do deslocamento inicial será considerado 70% do valor limite linear da curva de ruptura do material. De acordo com a norma PSA B32 0730, a determinação do carregamento inicial do Staircase pode ser feito por meio do cálculo por elementos finitos ou definido por meio de ensaios. O carregamento inicial do Staircase é um valor limite para resistência à fadiga do componente a  $10^6$  ciclos, considerando um comportamento médio, dado às variações de material, processo e geometria. Caso este limite seja conhecido por meio de método de elementos finitos, esta fase preliminar torna-se dispensável.

A fórmula matemática a seguir, calcula o valor inicial para os carregamentos a serem adotados para o ensaio de fadiga através do método de cálculo. Esta fórmula matemática não será utilizada nesta pesquisa, devido a dados necessários para este cálculo ainda serem desconhecidos, porém certifica a possibilidade de eventualmente utilizar outro método para o cálculo do carregamento inicial de fadiga.



$$Fd_0 = K.F_n \quad (1)$$

Onde:

$Fd_0$  : Deflexão inicial do Staircase.

$K$  : Coeficiente multiplicador de  $F_n$  para obter o comportamento médio.

$F_n$  : Deflexão de referência.

Dando como valor inicial do Staircase  $Fd_0^* = K = Fd^*$ .

Sendo que:

$$Fd_0^* = \frac{Fd_0}{F_n} \quad (2)$$

Onde:

$Fd_0^*$  : Coeficiente multiplicador para deflexão inicial do Staircase.

$Fd_0$  : Deflexão inicial do Staircase.

$F_n$  : Deflexão de referência.

A definição do nível inicial para o Staircase por meio de ensaio, adotado neste trabalho, tem como princípio determinar o carregamento-deflexão de maneira experimental onde se realiza o Locati sobre um corpo de provas nº 0. O Locati tem como método aplicar durante 300.000 ciclos a deflexão  $L^*$ . Caso não haja o rompimento do corpo de prova, deverá ser aplicado sobre o mesmo corpo de prova por mais 300.000 ciclos um incremento  $\Delta L^* = 10\%$  sobre a deflexão  $L^*$ , e assim seguidamente até obter a ruptura.

$$L_1^* = L^* + \Delta L^* \quad (3)$$

Onde:

$L_1^*$ : Deflexão inicial mais incremento utilizado a partir do 2º bloco do Locati.

$L^*$ : Deflexão inicial do Locati.

$\Delta L^*$ : Incremento de 10% sobre a deflexão.

Durante a realização do Locati, se o carregamento obtido for  $\geq 2,5 F_n$ , de acordo com a norma PSA B32 0730, considera-se que a fadiga não é dimensionável e o

Staircase poderá ser realizado sobre um número reduzido de peças. Conhecendo o valor de  $F_{d0}^* = F_{d0}/F_n$ , será determinada a média  $m^*$  do ensaio dos corpos de prova pelo método Staircase por meio do incremento ou diminuição nos níveis do ensaio ( $\Delta F^* = 10\%$ ).

O método Staircase é um processo iterativo, no qual cada corpo de prova passa por uma fase 1 e, eventualmente, por uma fase 2. Na fase 1, cada corpo de prova  $i$  é submetido a uma carga  $F_{d_i}$  por  $10^6$  ciclos. Resistindo a este número de ciclos, o mesmo corpo de prova vai para a fase 2, incrementando o valor da carga  $\Delta F^* = 10\%$  e submetendo-o a  $10^6$  ciclos, e assim sucessivamente até obter a ruptura. O corpo de prova seguinte ( $i+1$ ) passa então pela fase 1, sendo submetido a  $10^6$  ciclos sob uma carga  $F_{d_{i+1}} = F_{d_i} \pm \Delta F^*$ , conforme demonstrado no fluxograma da figura 5.

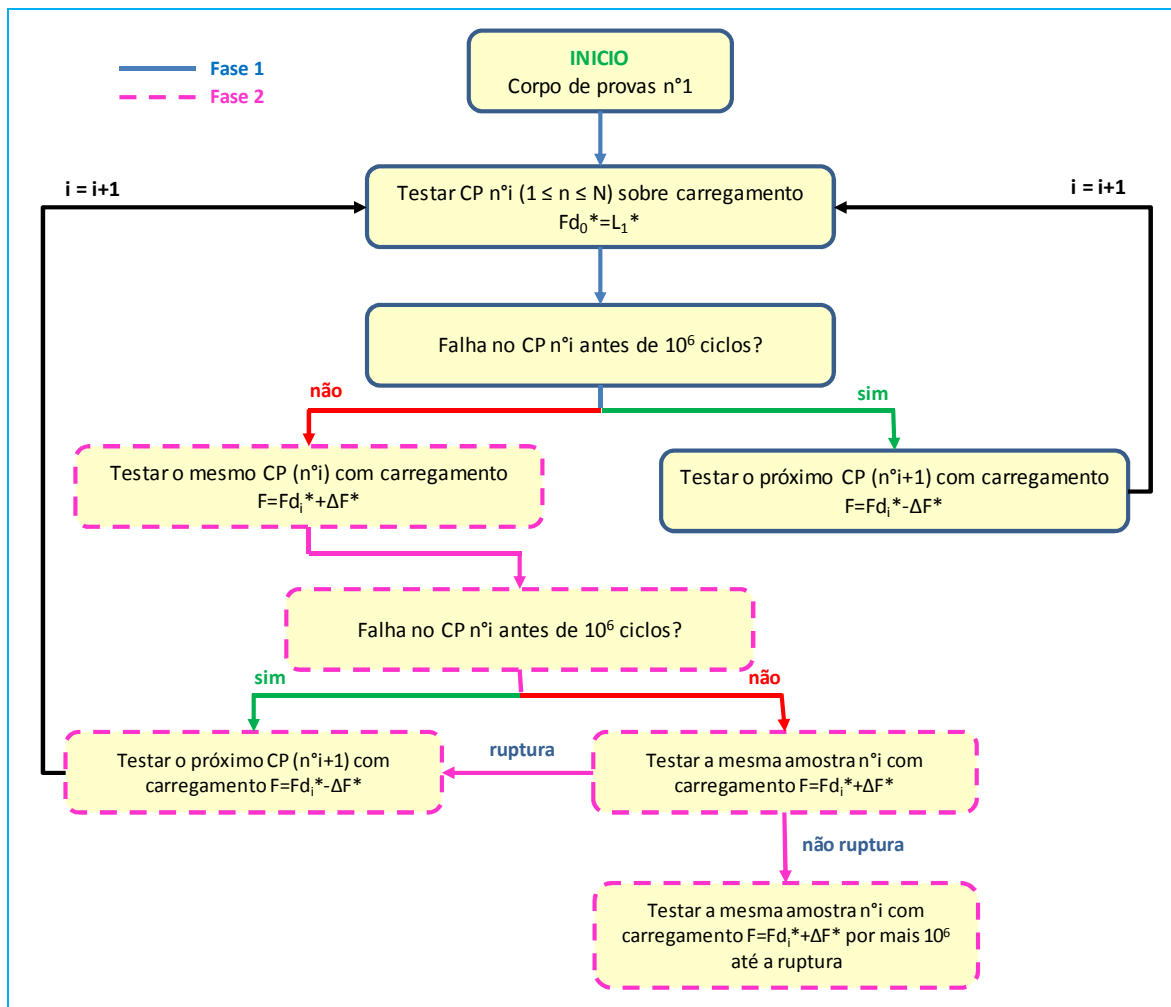


Figura 5: Ilustração do processo de ensaio de fadiga pelo método Staircase.

O número de corpo de prova a ser testado é compreendido entre 6 a 10. O número de não-rupturas deverá ser o mesmo que o número de rupturas para assegurar uma

aproximação suficiente da média  $m^*$  baseada em todos os blocos de ensaio, estando relacionada ao número de amostras testadas. Estas condições permitem a obtenção do desvio padrão,  $s^*$ , sobre a base dos ensaios do Staircase. Estes desvios padrões  $s^*$ , são calculados a partir dos carregamentos equivalentes  $Fd^*$ , que estão de acordo com a fase 1 e fase 2 do Staircase. Na fase 1 concentra-se os carregamentos iniciais das amostras. Na fase 2 são os carregamentos aplicados na mesma amostra que tiveram o incremento de  $\Delta F^* = 10\%$ . Na prática, os diferentes cenários do Staircase deverão ser tratados conforme demonstrado na tabela 7.

Tabela 7: Quantidade de corpos de prova e o respectivo estado de aceitação.

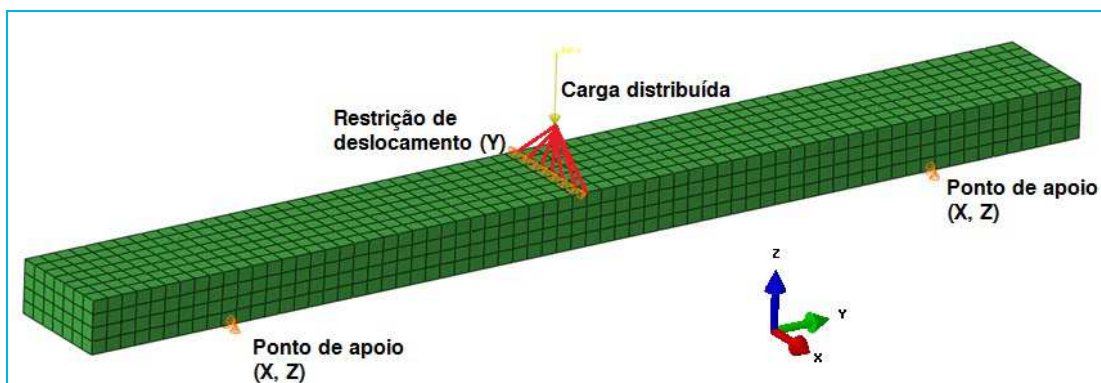
<b>6</b>	<b>NÚMERO DE CORPOS DE PROVA: 6</b>		
	<b>RUPTURA</b>	<b>NÃO RUPTURA</b>	<b>ESTADO DE ACEITAÇÃO</b>
<b>QTDE</b>	3	3	TERMINADO
<b>EM OUTROS CASOS O ENSAIO SEGUIRÁ (VER CONDIÇÃO SEGUINTE Nº7)</b>			
<b>7</b>	<b>NÚMERO DE CORPOS DE PROVA: 7</b>		
	<b>RUPTURA</b>	<b>NÃO RUPTURA</b>	<b>ESTADO DE ACEITAÇÃO</b>
<b>QTDE</b>	3	4	TERMINADO
	4	3	TERMINADO
<b>EM OUTROS CASOS O ENSAIO SEGUIRÁ (VER CONDIÇÃO SEGUINTE Nº8)</b>			
<b>8</b>	<b>NÚMERO DE CORPOS DE PROVA: 8</b>		
	<b>RUPTURA</b>	<b>NÃO RUPTURA</b>	<b>ESTADO DE ACEITAÇÃO</b>
<b>QTDE</b>	4	4	TERMINADO
	3	5	TERMINADO
	5	3	TERMINADO
<b>EM OUTROS CASOS O ENSAIO SEGUIRÁ (VER CONDIÇÃO SEGUINTE Nº9)</b>			
<b>9</b>	<b>NÚMERO DE CORPOS DE PROVA: 9</b>		
	<b>RUPTURA</b>	<b>NÃO RUPTURA</b>	<b>ESTADO DE ACEITAÇÃO</b>
<b>QTDE</b>	4	5	TERMINADO
	5	4	TERMINADO
<b>EM OUTROS CASOS O ENSAIO SEGUIRÁ (VER CONDIÇÃO SEGUINTE Nº10)</b>			
<b>10</b>	<b>NÚMERO DE CORPOS DE PROVA: 10</b>		
	<b>RUPTURA</b>	<b>NÃO RUPTURA</b>	<b>ESTADO DE ACEITAÇÃO</b>
<b>QTDE</b>	5	5	TERMINADO
	4	6	TERMINADO
	6	4	TERMINADO
<b>SE O NÚMERO DE AMOSTRAS CHEGAREM A 11 O ENSAIO SERÁ TERMINADO OU SUSPENSO</b>			

Caso o número de corpos de prova testados chegue a 11, o Staircase será terminado ou suspenso. As rupturas e não rupturas estando inferiores ou iguais a 3/8 ou

superiores ou iguais a  $8/3$  indicará uma grande dispersão, que pode estar ligada ao mal processamento dos corpos de prova, fazendo com que os métodos de cálculos aqui aplicados não sejam confiáveis.

As observações feitas por microscopia eletrônica por varredura (MEV) foram realizadas com o equipamento JEOL - JSM-6510 no laboratório da Universidade Presbiteriana Mackenzie, nos corpos de prova ensaiados em fadiga pelo método Staircase. Esta técnica permitirá analisar os mecanismos de fratura das poliamidas/fibras nos corpos de prova ensaiados pelo método Staircase.

O método de análise por Elementos Finitos (FEA) foi utilizado como suporte em vários momentos deste estudo de fadiga em polímeros. Os cálculos estruturais foram realizados com o software de simulação numérica ABAQUS (Dassault Software) de acordo com o procedimento PSA AGCC\_ADTR08\_0638, específico para componentes estruturais ligados a suspensão do motor. De acordo com o procedimento, foi utilizado o tipo de malha hexaédrica, o corpo de prova foi modelado da forma mais fidedigna, modelando-se os apoios, o punção e os contatos destes com o corpo de prova, conforme Desenho 4.



Desenho 4: Corpo de prova utilizando malha de 2ª ordem.

Inicialmente, o cálculo estrutural foi utilizado para verificar os modos naturais de vibração do sistema dispositivo e corpo de prova, a fim de evitar que a frequência definida para o atuador durante o ensaio de fadiga cause ressonância no sistema. Em uma segunda etapa, foi realizada a representação virtual do ensaio estático para cada compósito, considerando-se a mesma geometria e adequando-se a curva característica do material, afim de que resulte no mesmo comportamento carga-deslocamento.

Esse processo de adequação das descrições elasto-plásticas de cada compósito consistiu num processo iterativo para equiparar a resposta carga-deslocamento do ensaio

virtual com o ensaio físico realizado. Esse processo se conclui ao obter-se um erro menor que 5% entre físico e virtual.

Dado que dos ensaios de fadiga, o resultado foi um valor médio  $m^*$  de deslocamento aplicado (em mm), para que os resultados sejam aplicados no desenvolvimento de componentes, o que se deseja é obter um valor de tensão limite de fadiga para cada compósito. Para tanto, é necessário um cálculo por elementos finitos, porque ele permite assim, correlacionar o deslocamento  $m^*$  com um valor de tensão na região de aparecimento das trincas nos corpos de prova. O sucesso da correta obtenção da tensão limite de fadiga a partir de um deslocamento é garantido pela similaridade geométrica entre o físico e o virtual, e pela caracterização do material realizada na representação do ensaio estático de ruptura. Desta forma, em futuros desenvolvimentos de componentes, o Método de Elementos Finitos será aplicado, tendo-se como condição de contorno, a tensão limite de fadiga obtida com esta metodologia.

Os cálculos estruturais foram realizados com o software de simulação numérica ABAQUS (Dassault SFT) de acordo com o procedimento PSA AGCC\_ADTR08\_0638, específico para componentes estruturais ligados a suspensão do motor. Os esforços máximos são avaliados como carregamentos estáticos aos quais o componente deverá resistir sem sofrer qualquer tipo de deformação elástica. De acordo com procedimento PSA AGCC\_ADTR08\_0638, o critério de aprovação para este cálculo utiliza como padrão de aprovação o próprio valor de tensão de escoamento do material ( $R_e$ ). A figura 6 mostra os níveis de aprovação ( $R_e - 10\%$ ,  $R_e$  e  $R_e + 10\%$ ) ou reprovação ( $\sigma_{maxi}$ ) para realização dos cálculos por elementos finitos.

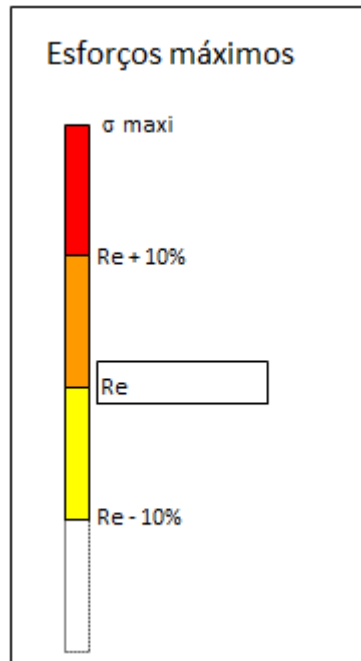


Figura 6: Critério de aprovação de esforços máximos.

Os esforços excepcionais são considerados como carregamentos abusivos que durante a vida do veículo poderão acontecer e o componente deverá resistir a esse carregamento sem sofrer deformação plástica. De acordo com o procedimento PSA AGCC\_ADTR08\_0638, o critério de aprovação para este cálculo utiliza como padrão de aprovação duas vezes o valor de tensão de escoamento ( $2.Re$ ). A figura 7 mostra os níveis de aprovação ( $2.Re - 10\%$ ,  $2.Re$  e  $2.Re + 10\%$ ) ou reprovação ( $\sigma \text{ maxi}$ ) para realização dos cálculos por elementos finitos.

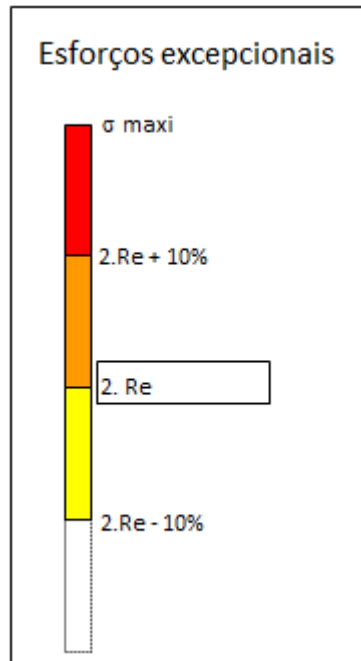
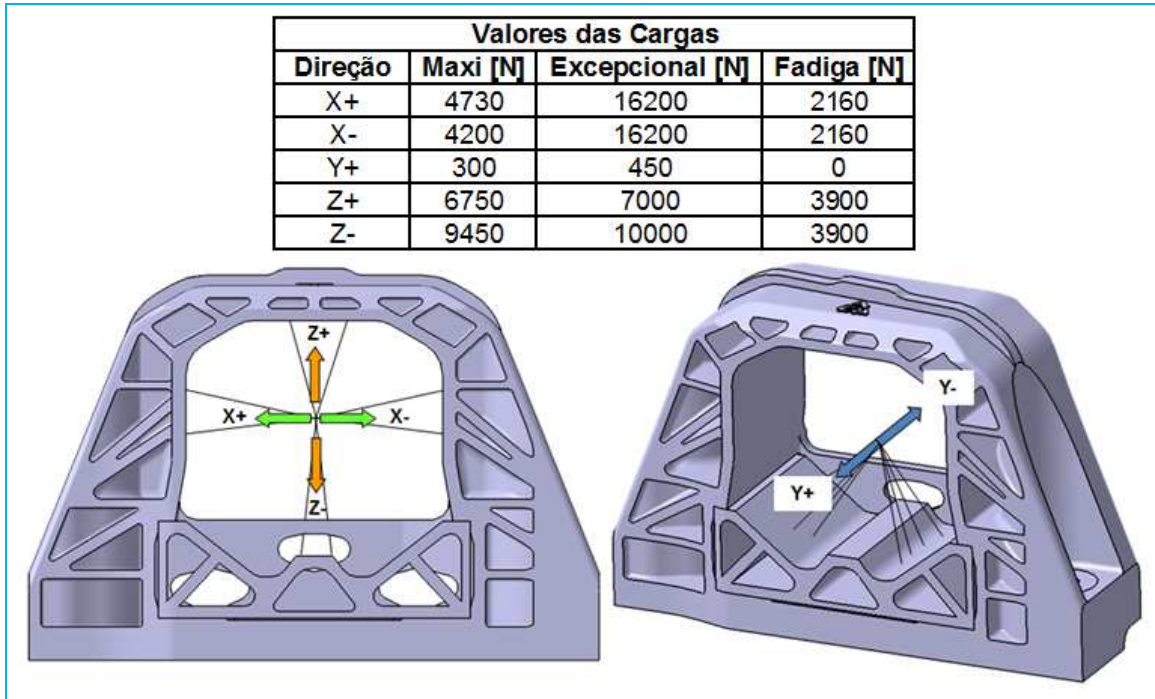


Figura 7: Critério de aprovação esforços excepcionais.

De acordo com a curva de ruptura em deflexão será possível descobrirmos o limite de ruptura ( $R_m$ ) e o limite elástico ( $Re$ ), o que dispensa a regra imposta pelo procedimento.

Os esforços de fadiga são considerados como carregamentos cíclicos e para este projeto foram extraídos por meio do ensaio veicular, medidos pelos captadores de esforços. O procedimento AGCC\_ADTR08\_0638 utiliza para liga de alumínio 50% do limite elástico ( $Re$ ) como critério de aprovação, para critério de aprovação desta pesquisa o cálculo por elementos finitos utilizará a média dos resultados do ensaio de fadiga aplicados ao cálculo de tensão do corpo de provas.

O desenho 5 mostra os carregamentos utilizados para o cálculo estrutural de esforços excepcionais, máximos e fadiga, e também as direções de aplicações dos carregamentos.



Desenho 5: Carregamentos utilizados para os cálculos estruturais e direções de aplicação.

Para a direção Y os esforços de fadiga são pequenos, não sendo calculados pelo método de elementos finitos por não apresentarem representatividade ou risco estrutural.

O projeto inicial da carcaça em compósito à base de poliamida com fibra de vidro como reforço tomou como base o coxim motor com sua carcaça concebida em liga de alumínio injetado SAE 306 e sua base plástica em PA 6.6 GF35 com sua massa total calculada de 0,625 kg. No desenho 6 é mostrado a carcaça de alumínio injetado e a base de poliamida aplicada nos coxins atuais.



Desenho 6: Carcaça em alumínio injetado mais base plástica em poliamida com 35% de fibra de vidro.



A carcaça em poliamida utiliza insertos em aço 1020 nas zonas de fixação para garantir uma boa junta rígida ao parafuso M10x1,5. Para a geometria proposta nesta pesquisa, tem-se uma massa prevista de 0,497 kg, representando inicialmente uma redução de massa de 20%.

Será considerado que o alinhamento das fibras terá homogeneidade no sentido dos carregamentos sofridos nas regiões de maior tensão. De acordo com CHALVET (2012), o estudo da orientação das fibras para a geometria de um componente é fundamental para garantir a boa resistência dos carregamentos em utilização. O estudo de orientação das fibras não está contemplado nesta pesquisa, visto que uma vez definido o produto, o conceito processual ligado à injeção da poliamida poderá ser feito em uma próxima etapa, após a decisão de industrialização do componente.

A decisão sobre o percentual de fibra de vidro a ser adotado no projeto leva em consideração a redução de massa e a utilização do compósito com o melhor desempenho. De acordo com SILVA ET all (2012), por meio das análises feitas por elementos finitos, adotando como critério o menor deslocamento em operação e menor massa do compósito, teve como resultado a escolha da poliamida com 50% de fibra de vidro, conforme exemplo da figura 8.

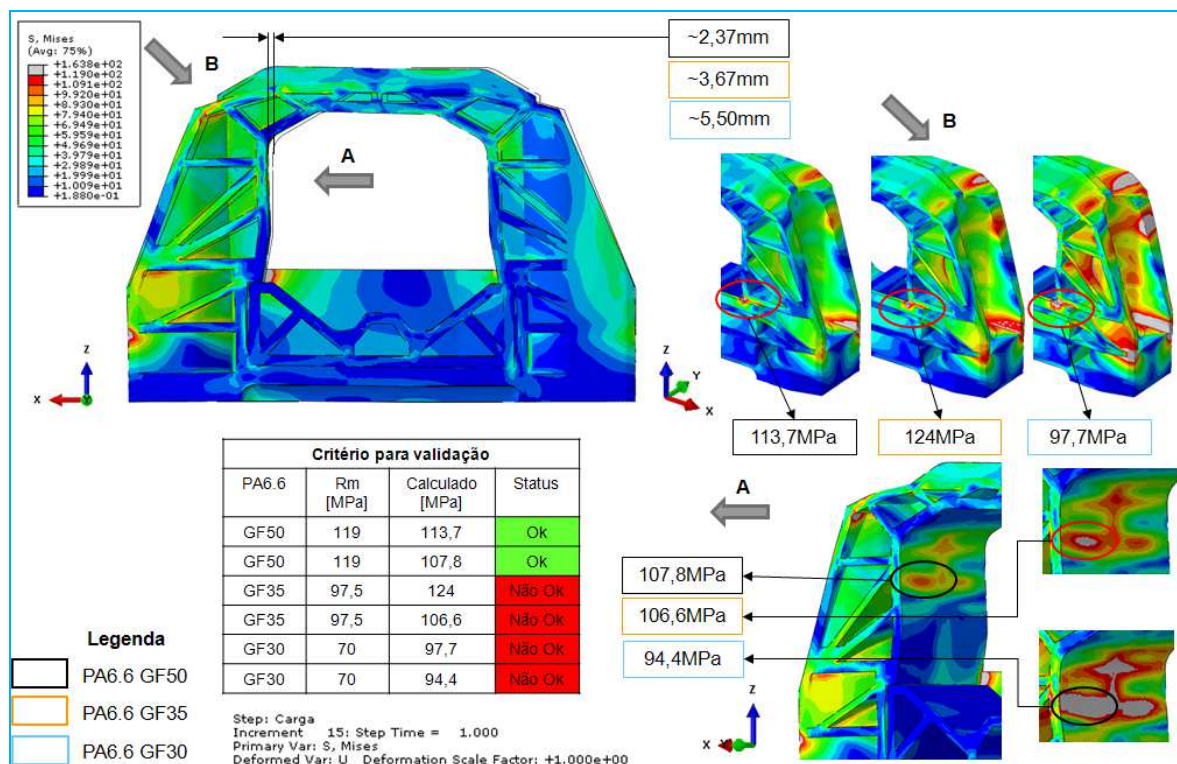


Figura 8: Exemplo de resultados para carregamento excepcional X+ (SILVA ET all, 2012).

Podemos verificar que os maiores níveis de tensão encontrados para os compósitos de poliamida GF30 e GF35 são superiores aos níveis de tensão especificados para aprovação, e de acordo com o critério de análise estrutural, as mesmas se encontram reprovadas. Para utilização dos compósitos de poliamida GF30 e GF35, a geometria deverá ser reformulada aumentando sua massa, incluindo nervuras, ou até mesmo modificando a geometria para proporcionar melhor resistência aos carregamentos, e assim, diminuir os níveis de tensão para atender ao critério de validação.

A adoção do percentual de fibra estudado para a geometria de pesquisa será feita de acordo com os objetivos impostos de encontrar o valor da média  $m^*$  de fadiga e defini-los como parâmetro para calcular por meio do método de Elementos Finitos o melhor compromisso entre os compósitos. A expectativa para esta nova definição será de ter uma redução de massa de aproximadamente 25% em relação à carcaça em liga de alumínio injetado, oferecendo o mesmo desempenho funcional e contribuindo assim para redução de consumo do veículo.

#### 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para a determinação do  $R_{p02}$  foram realizados os ensaios de ruptura em flexão, com a finalidade de obter a curva de carregamento-deflexão dos compósitos. Inicialmente, determinou-se que o dispositivo de ensaio tenha um deslocamento vertical de 20 mm para realização dos ensaios, mas para o corpo de prova da poliamida sem fibra de vidro foi necessário um deslocamento maior que o projetado, devido a não apresentar ruptura. Portanto, foi adaptado ao dispositivo um aumento de 10 mm, totalizando 30 mm de deslocamento vertical, permitindo assim a conclusão do ensaio. Na figura 9 é mostrado o aparato para execução dos ensaios de flexão. A figura de 10 mostram as curvas carregamento-deflexão dos compósitos e da poliamida obtidas nos ensaios de flexão na temperatura de 120°C.



Figura 9: Aparato para execução do ensaio de flexão na temperatura de 120°C.

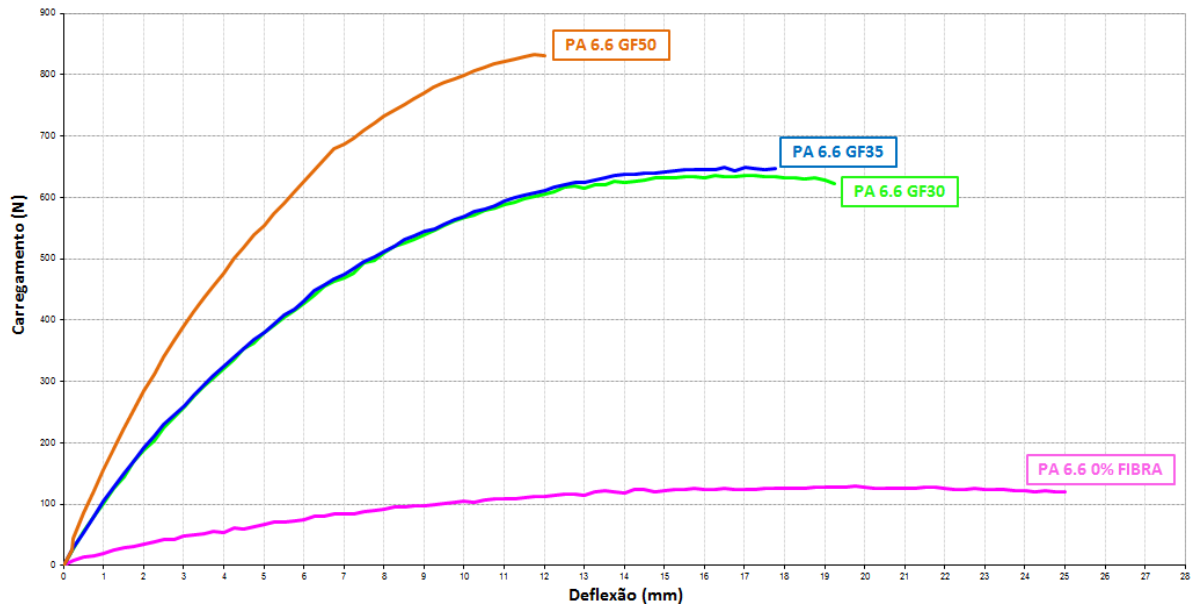


Figura 10: Curva carregamento-deflexão do compósito PA 6.6 GF30, PA 6.6 GF35, PA 6.6 GF50 e PA 6.6 sem fibra de vidro.

Os ensaios de fadiga foram executados baseados nas deflexões provocadas nos corpos de prova a partir das cargas aplicadas ( $R_{p02}$ ). A determinação das deflexões empregadas nos ensaios de fadiga seguiram os seguintes cálculos mostrados a seguir (GERE, 2003).

Na figura 11 mostra um exemplo de uma viga em flexão pura para mostrar o raio da curvatura de uma barra em flexão.

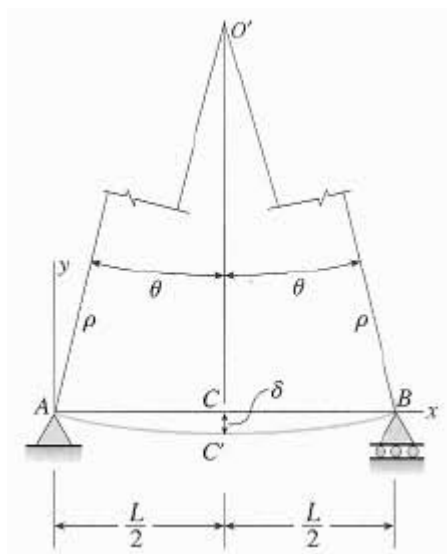


Figura 11: Viga em flexão pura: (a) viga com carregamento e (b) curva de deflexão.

$$\rho = \frac{-y}{Ex} \quad (4)$$

Sendo:

$\rho$  : Raio da curvatura da barra em flexão.

$y$  : Distância da superfície inferior até a linha neutra ( $\frac{h}{2}$ ).

$Ex$  : Deformação longitudinal na superfície inferior.

Logo:

$$Ex = \frac{-y}{\rho} \quad (5)$$

O interesse é correlacionar à deformação longitudinal com a deflexão vertical ( $\delta$ ), sendo que:

$$\delta = \rho.(1 - \cos \theta) \quad (6)$$

Onde:

$\delta$  : Deflexão vertical da barra em flexão.

$\rho$  : Raio da curvatura da barra em flexão.

$\theta$  : Ângulo da curvatura.

$$\text{Sendo que } \sin \theta = \frac{\left(\frac{L}{2}\right)}{\rho} \quad (7)$$

Portanto,  $\sin \theta$  pode ser aproximado para o valor de  $\theta$  devido ao valor ser pequeno, então:

$$\delta = \rho \cdot \left\{ 1 - \cos \left[ \frac{\left(\frac{L}{2}\right)}{\rho} \right] \right\} \quad (8)$$

Considerando que  $E_x = 0,002$  de acordo com a metodologia de Rp02, o raio é de aproximadamente 1.500 mm chegando à deflexão de aproximadamente 1 mm. Este resultado de 1 mm aplica-se ao rebatimento das curvas de carregamento-deflexão. Sendo assim, 1 mm de deflexão corresponde a 0,2% de deformação na superfície inferior da barra. Nos gráficos das figuras de 12 a 15 são mostradas as deflexões utilizadas nos ensaios de fadiga, a partir das curvas carregamento-deflexão. Na tabela 8 são apresentadas as deflexões iniciais efetivamente utilizadas nos ensaios de fadiga (Método Locati), que correspondem a 70% do valor obtido para o Rp02 descrito anteriormente. Devido aos baixos valores dos carregamentos, que dificultaria o ensaio de fadiga controlado pela carga, optou-se em realizar os ensaios através da variação de deslocamentos.

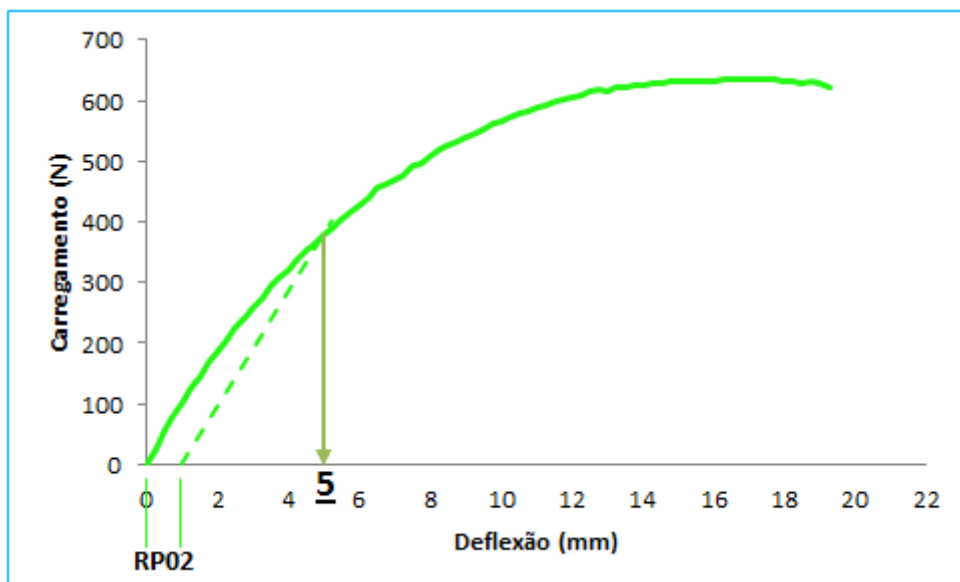


Figura 12: Determinação do valor de deflexão inicial para o ensaio de fadiga do compósito PA 6.6 GF30.

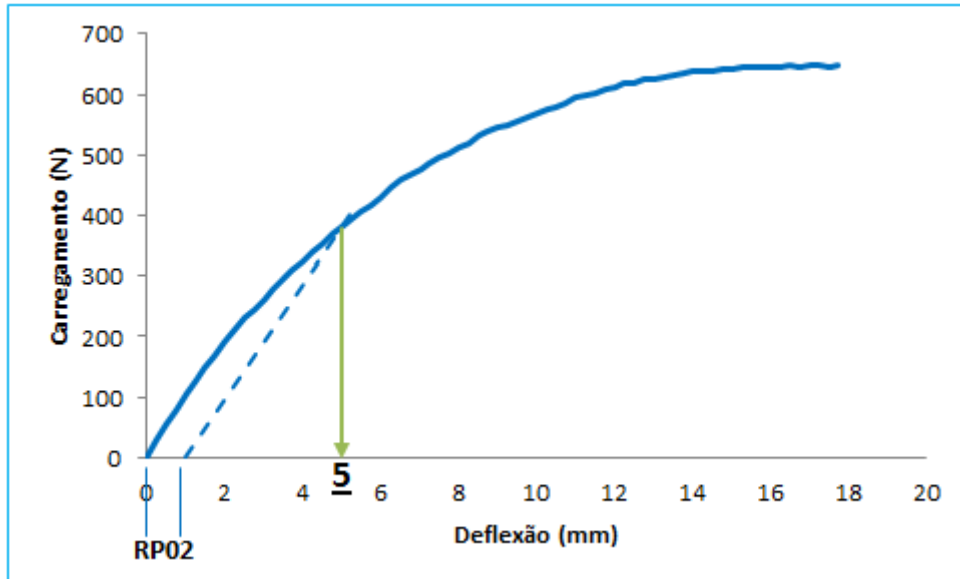


Figura 13: Determinação do valor de deflexão inicial para o ensaio de fadiga do compósito PA 6.6 GF35.

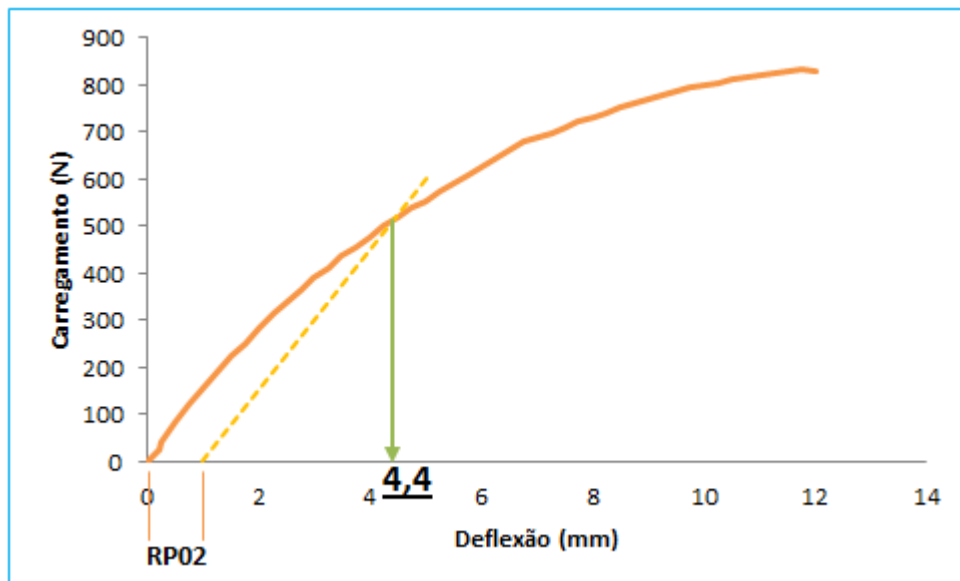


Figura 14: Determinação do valor de deflexão inicial para o ensaio de fadiga do compósito PA 6.6 GF50.

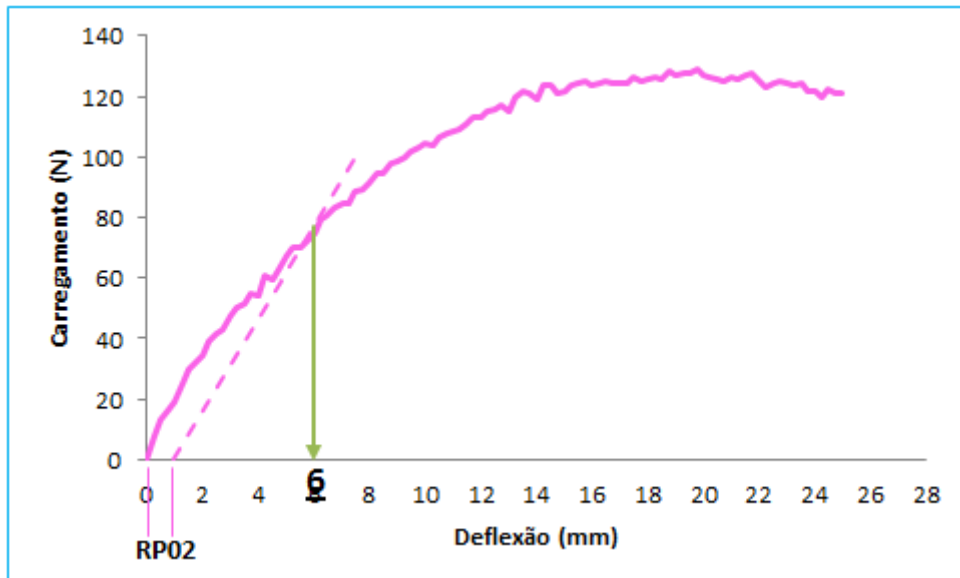


Figura 15: Determinação do valor de deflexão inicial para o ensaio de fadiga da PA 6.6 sem fibra de vidro.

Tabela 8: Valores do carregamento-deflexão utilizados para ensaio método Locati.

POLIAMIDA/COMPOSITO	RP02 (mm)	70% RP02 (mm)	L = F <sub>n</sub> (mm)
<b>GF30</b>	5	3,5	<b>3,5</b>
<b>GF35</b>	5	3,5	<b>3,5</b>
<b>GF50</b>	4,4	3,1	<b>3</b>
<b>Sem fibra de vidro</b>	6	4,2	<b>4,2</b>

As tabelas de 9 a 12 mostram os resultados para determinação das deflexões iniciais para execução dos ensaios de fadiga pelo método Staircase. Observou-se que nos compósitos PA 6.6 GF30 e PA 6.6 GF35, a fratura ocorreu em condições muito próximas, gerando assim os mesmos valores de deflexão para o início dos ensaios de fadiga pelo método Staircase. O compósito PA 6.6 GF35 apresentou valor de deflexão inicial para ensaio de fadiga pelo método Staircase levemente menor. O compósito PA 6.6 0% de fibra de vidro, chegou até o décimo segundo bloco sem apresentar fratura e, de acordo com a norma PSA B32 0730, acabou superando  $2,5.F_n$  tornando-se um caso não dimensionável. Sob esta situação, o valor da deflexão para iniciar o ensaio de fadiga pelo método Staircase sobre três corpos de prova será o valor correspondente a  $2,5.F_n$  aplicados por  $10^6$  ciclos, no caso de apresentação de falha antes do cumprimento de  $10^6$  ciclos, o ensaio estará encerrado, devendo reiniciar o Locati em uma outra amostra para certificação do primeiro resultado.



Os valores limites antes da ruptura, apresentados nas tabelas de 9 a 12, são os valores de deflexão que iniciaram o ensaio de fadiga pelo método Staircase. A tabela 13 mostra as deflexões iniciais pertinentes a cada compósito e poliamida.

Tabela 9: Determinação do valor inicial de deflexão para execução dos ensaios pelo método Staircase (LOCATI) do compósito PA 6.6 GF30.

Determinação do valor inicial para o STAIRCASE (LOCATI)												
Fn = 3,5 ± 0,2 mm												
Temperatura de ensaio (°C): 120												
Frequencia (Hz): 25												
Carregamento	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Nº de ciclos (mil ciclos)	300	300	290									
L (mm)	3,50	3,85	4,24									
Valor limite antes da ruptura (mm): 3,85 = Fd*												

Tabela 10: Determinação do valor inicial de deflexão para execução dos ensaios pelo método Staircase (LOCATI) do compósito PA 6.6 GF35.

Determinação do valor inicial para o STAIRCASE (LOCATI)												
Fn = 3,5 ± 0,2 mm												
Temperatura de ensaio (°C): 120												
Frequencia (Hz): 25												
Carregamento	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Nº de ciclos (mil ciclos)	300	300	282									
L (mm)	3,50	3,85	4,24									
Valor limite antes da ruptura (mm): 3,85 = Fd*												

Tabela 11: Determinação do valor inicial de deflexão para execução dos ensaios pelo método Staircase (LOCATI) do compósito PA 6.6 GF50.

Determinação do valor inicial para o STAIRCASE (LOCATI)												
Fn = 3 ± 0,2 mm												
Temperatura de ensaio (°C): 120												
Frequencia (Hz): 25												
Carregamento	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Nº de ciclos (mil ciclos)	300	300	153									
L (mm)	3,00	3,30	3,63									
Valor limite antes da ruptura (mm): 3,30 = Fd*												

Tabela 12: Determinação do valor inicial de deflexão para execução dos ensaios pelo método Staircase (LOCATI) da PA 6.6 sem fibra de vidro.

Determinação do valor inicial para o STAIRCASE (LOCATI)												
Fn =		4,2	±	0,2	mm							
Temperatura de ensaio (°C):		120										
Frequencia (Hz):		25										
Carregamento	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Nº de ciclos (mil ciclos)	300	300	300	300	300	300	300	300	300	300	300	300
L (mm)	4,20	4,62	5,08	5,59	6,15	6,76	7,44	8,18	9,00	9,90	10,89	11,98
Valor limite antes da ruptura (mm):		11,98 = Fd*										

Tabela 13: Deflexões iniciais para a execução dos ensaios de fadiga pelo método Staircase.

Poliamida/Composito	Deslocamento inicial para o Staircase (Fd <sub>0</sub> )
PA 6.6 GF30	3,85 mm
PA 6.6 GF35	3,85 mm
PA 6.6 GF50	3,30 mm
PA 6.6 sem fibra de vidro	11,98 mm

Na figura 16 são mostrados os corpos de prova fraturados nos ensaios de fadiga pelo método Staircase. A quantidade de corpos de prova a ser testada já havia sido definida na tabela 07. Nos gráficos das figuras de 19 a 22 são apresentados os resultados dos ensaios de fadiga pelo método Staircase. A falha ou ruptura significa que o corpo de prova fraturou antes de atingir 10<sup>6</sup> ciclos. Neste caso foi indicado com a palavra “falha”. Quando o corpo de prova não rompeu até 10<sup>6</sup> de ciclos, o ensaio foi interrompido e foi indicada a palavra “sobreviva”.



Figura 16: Corpos de prova ensaiados em fadiga pelo método Staircase.

A seguir as figuras 17, 18 e 19 mostram com detalhe a região de fratura do corpo de provas.



Figura 17: Detalhe da fratura no corpo de provas PA 6.6 GF30.

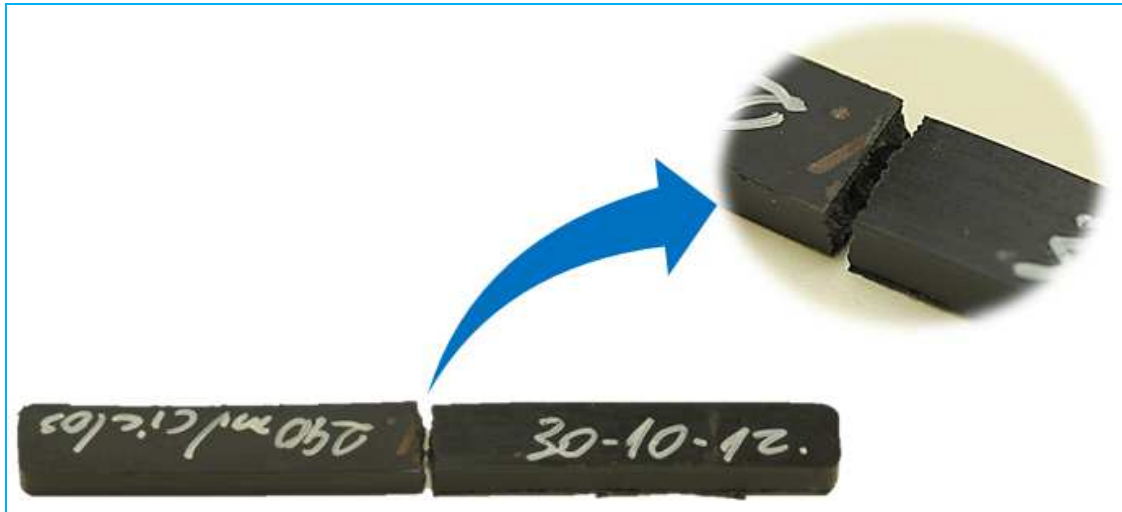


Figura 18: Detalhe da fratura no corpo de provas PA 6.6 GF35.



Figura 19: Detalhe da fratura no corpo de provas PA 6.6 GF50.

Nos casos dos compósitos PA 6.6 GF30 e PA 6.6 GF35 foi executada a mesma quantidade de ensaios, porém com resultados diferentes de deflexão. Enquanto que no compósito PA 6.6 GF30 foi necessária uma deflexão de 5,12 mm com quatro sobrevidas e três falhas nos ensaios de fadiga pelo método Staircase, no compósito PA 6.6 GF35 foi necessária uma deflexão de 4,66 mm também com quatro sobrevidas e três falhas nos ensaios de fadiga pelo mesmo método Staircase. Para o compósito PA 6.6 GF50 foram testados seis corpos de prova, com três sobrevidas e três falhas, chegando à deflexão máxima pelo método Staircase de 3,63 mm. Em relação ao compósito PA 6.6 GF30 o compósito PA 6.6 GF50 teve a deflexão máxima 29% menor por conter mais fibra de vidro em sua formulação. O compósito

PA 6.6 GF35 apresentou, como esperado, uma menor deflexão em relação ao compósito PA 6.6 GF30.

Os resultados comprovam a grande influência das fibras de reforço na resistência aos esforços, para o desempenho do componente em questão. Verifica-se ainda uma grande diferença na utilização do percentual de fibra, como indicado nos resultados a PA GF50, que destaca-se oferecendo o menor deslocamento em operação. De acordo com SILVA ET all (2012), em seus ensaios de fadiga por deslocamento, também foram mostrados que, obedecendo à mesma geometria de projeto, o compósito PA 6.6 GF30 teve maior deslocamento do que os compósitos PA 6.6 GF35 e PA 6.6 GF50, mostrando em sua análise o desempenho soberano da PA 6.6 GF50 em relação aos deslocamentos em operação.

Com a finalidade de esclarecer o método em relação às falhas e sobrevidas, o exemplo a seguir exhibe o controle dos corpos de prova ensaiados pelo método Staircase. A tabela 14 mostra os corpos de provas testados até o seu rompimento, porém, sua classificação dependia de sua resistência à primeira fase de ciclagem submetida a  $10^6$  ciclos, na tabela seguinte, verifica-se na coluna (i) o número de amostras testadas para cada compósito de poliamida com fibra de vidro ou a poliamida sem fibra de vidro. Este controle consiste em classificar cada corpo de prova, quando aplicado o carregamento-deflexão em uma mesma amostra e se houver a resistência a  $10^6$  ciclos, a mesma será classificada como sobrevida (O), passando assim para a segunda fase de carregamento (carregamento 2) acrescido do incremento ( $\Delta F^*$ ) e em caso de resistência, a mesma passará para a terceira fase de carregamento (carregamento 3) acrescido do incremento ( $\Delta F^*$ ) e assim sucessivamente até acontecer a ruptura, devendo ser considerado como carregamento-deflexão para o próximo corpo de prova, o último valor em que houve a ruptura. Para o caso do corpo de prova não resistir a  $10^6$  ciclos na primeira fase de carregamento-deflexão, este corpo de prova será classificado como falha (X), devendo diminuir o incremento ( $\Delta F^*$ ) sobre o carregamento vigente para ensaiar o próximo corpo de prova.

Tabela 14: Controle de ensaio PA 6.6 GF50 - Exemplo do ensaio de fadiga pelo método Staircase.

F1* =		1,10		Passo:		10%							
Peças rompidas (falha): X													
Peças não rompidas (sobrevivida): O													
Fi*	0,802	0,891	0,990	1,100	1,210	1,331			Carregamento 2		Carregamento 3		
Fi (mm)	2,41	2,67	2,97	3,30	3,63	3,99	N (MC)	i	N (MC)	Fi	N (MC)	F	
				O			1	1	0,425	3,63		-	
					X		0,35	2		-		-	
				X			0,85	3		-		-	
			O				1	4	0,463	3,30		-	
				X			0,565	5		-		-	
			O				1	6	0,964	3,30		-	
								7				-	
								8				-	
								9				-	
								10				-	
								11				-	
												-	

Para a poliamida 6.6 sem fibra de vidro foram testados três corpos de prova devido ao método Locati ter apresentado  $2,5. F_n$ , resultando uma deflexão de 11,98 mm. Esta deflexão não acarretou ruptura do corpo de prova durante a realização do ensaio de fadiga. De acordo com a norma PSA B32 0730 trata-se de um caso não dimensionável. A deflexão representa um aumento de 230% em relação ao compósito PA 6.6 GF50. Como esperado, as propriedades mecânicas em fadiga da poliamida são inferiores as dos compósitos PA 6.6 GF30, PA 6.6 GF35 e PA 6.6 GF50. Com exceção da poliamida 6.6 sem fibra de vidro, os compósitos de matriz poliamida e reforço de fibra de vidro apresentaram um bom comportamento nos ensaios de fadiga pelo método Staircase, mantendo uma baixa dispersão entre as amostras. Em destaque o compósito PA 6.6 GF50 apresentou a menor dispersão entre os compósitos, tendo sua média de deflexão de 3,25 mm próximo à deflexão inicial.

Os gráficos 20 à 23 mostram os resultados do ensaio de fadiga pelo método Staircase.

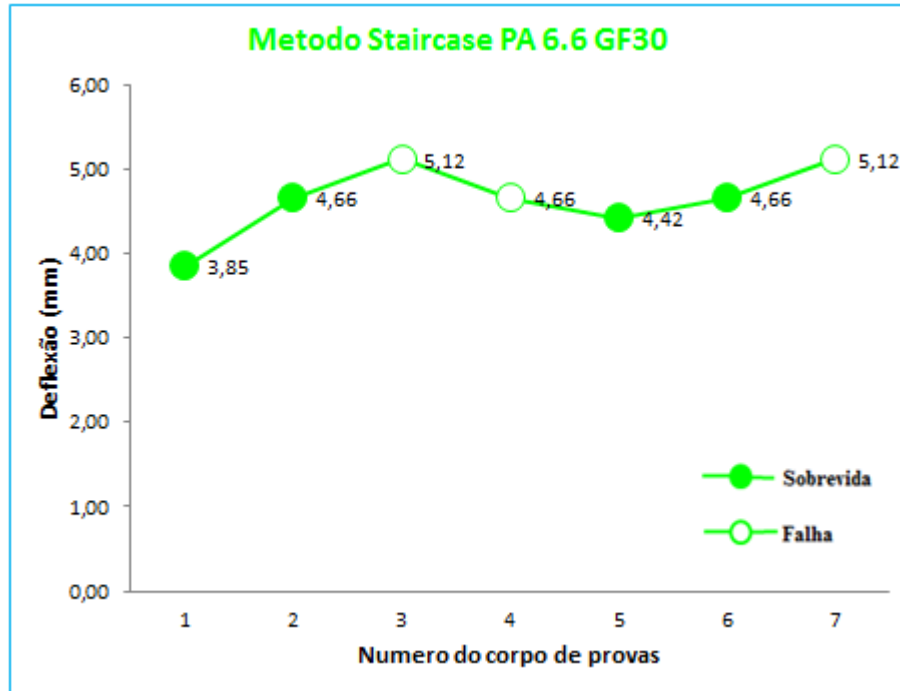


Figura 20: Gráfico mostrando os resultados dos ensaios de fadiga pelo método Staircase do compósito PA 6.6 GF30.

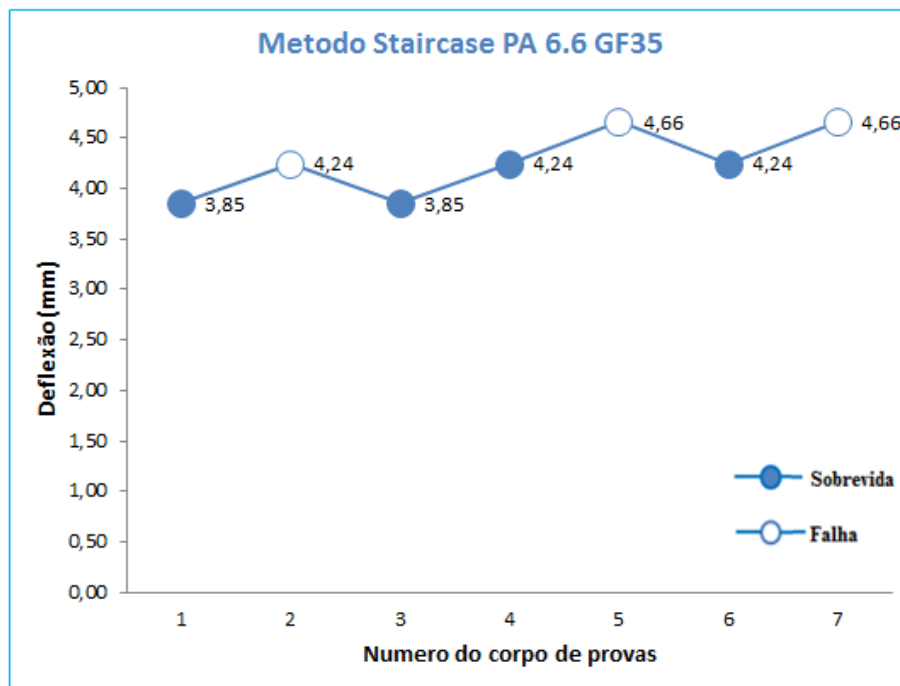


Figura 21: Gráfico mostrando os resultados dos ensaios de fadiga pelo método Staircase do compósito PA 6.6 GF35.

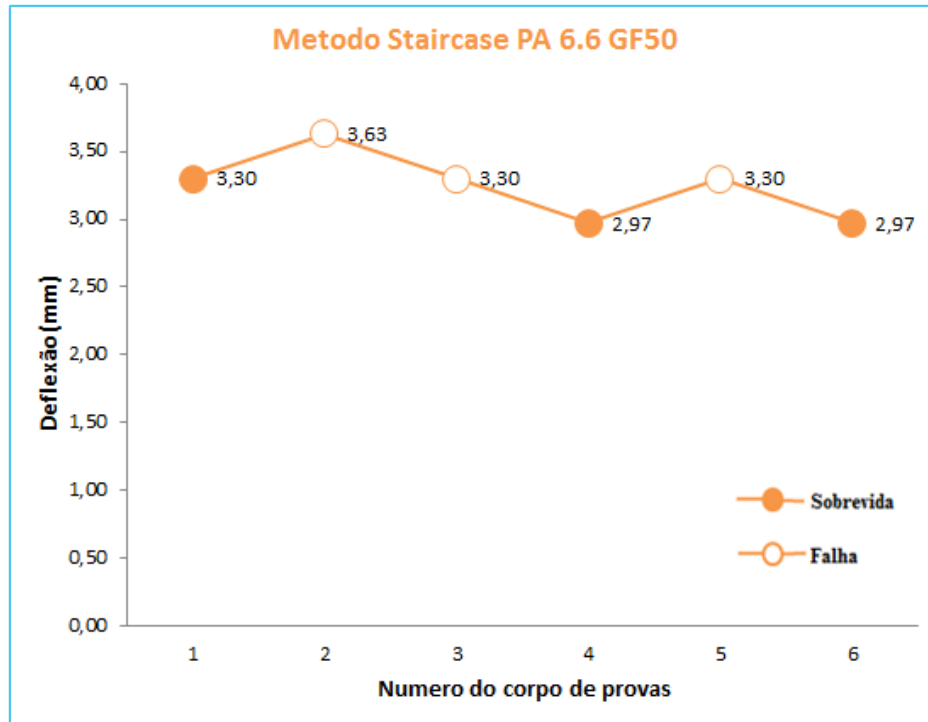


Figura 22: Gráfico mostrando os resultados dos ensaios de fadiga pelo método Staircase do compósito PA 6.6 GF50.

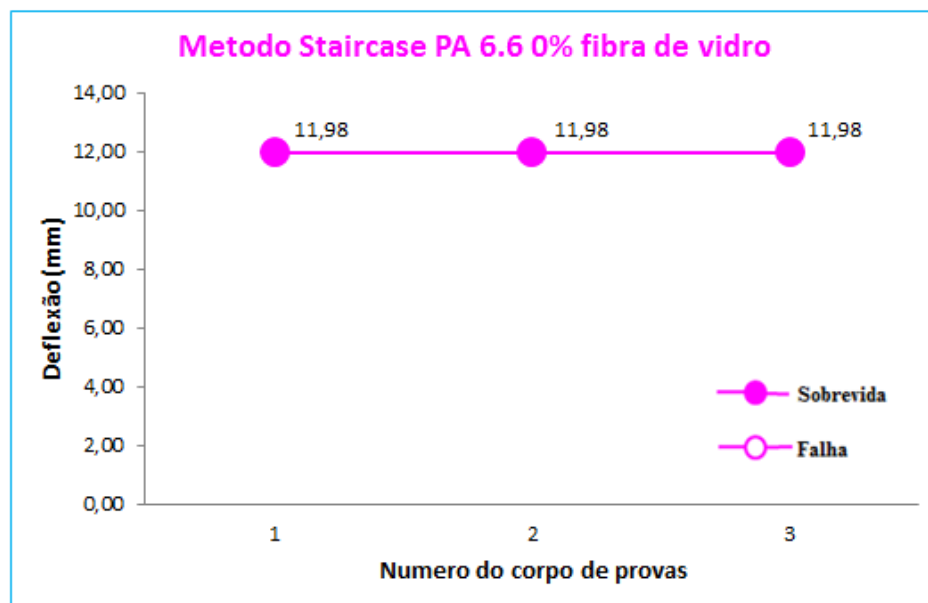


Figura 23: Gráfico mostrando os resultados dos ensaios de fadiga pelo método Staircase da poliamida pelo método Staircase PA 6.6.

Após o término dos ensaios de fadiga pelo método Staircase, definiu-se a média ( $m^*$ ) para a deflexão da poliamida e dos compósitos, conforme apresentado na tabela 15. Classicamente os materiais metálicos apresentam seu limite de fadiga em torno de 50% do seu limite elástico. Dado que o método Locati se iniciou com valores de 70% do



carregamento determinado no ensaio estático de flexão, pode-se dizer que as poliamidas com algum teor de fibra de vidro apresentaram comportamento análogo, pois apresentaram fadiga próximo dos valores iniciais dos ensaios. Para a poliamida 6.6 sem fibra de vidro, o comportamento não foi análogo, não se caracterizando como material de comportamento similar aos metálicos, como proposto por SILVA ET all (2012).

De acordo com os resultados obtidos nos ensaios de fadiga pelo método Staircase na tabela 15 é apresentada a média  $m^*$  correspondente para a poliamida e os compósitos de poliamida.

Tabela 15: Média ( $m^*$ ) das deflexões dos ensaios de fadiga pelo método Staircase para a poliamida e para os compósitos.

Poliamida/Composito	Média ( $m^*$ )
PA 6.6 GF30	4,64 mm
PA 6.6 GF35	4,25 mm
PA 6.6 GF50	3,25 mm
PA 6.6 sem fibra de vidro	11,98 mm

A seguir apresentaremos o memorial de cálculo para correlacionarmos a deflexão média  $m^*$  com a força (N) e tensão ( $\sigma$ ).

$$M_{máx} = \left[ F \cdot \left( \frac{L}{4} \right) \right] \quad (9)$$

Onde:

$M_{máx}$  : Momento fletor máximo.

$F$  : Força.

$L$  : Comprimento.

Correlacionando com:

$$\sigma = \frac{M}{S} \quad (10)$$

Onde:

$\sigma$  : Tensão.

$M$  : Momento fletor.

$S$  : Modulo da seção.

Sendo que:

$$S = \frac{b.h^2}{6} \quad (11)$$

Onde:

$S$  : Modulo da seção.

$b$  : Base do corpo de prova.

$h$  : Altura do corpo de prova.

Teremos a correlação final de:

$$\sigma = \left[ \left( \frac{3}{2} \right) \left( \frac{F.L}{b.h^2} \right) \right] \quad (12)$$

Utilizando os resultados dos ensaios de fadiga pelo método Staircase, teremos na tabela 16 a correlação entre a deflexão média  $m^*$  com a força (N) e tensão ( $\sigma$ ).

Tabela 16: Correlação média  $m^*$ , força (N) e tensão (MPa).

Poliamida/Composito	Média $m^*$ (mm)	F (N)	$\sigma$ (MPa)
PA 6.6 GF30	4,64	358	101,22
PA 6.6 GF35	4,25	339	95,85
PA 6.6 GF50	3,25	414	117,06
PA 6.6 sem fibra de vidro	11,98	114	32,23

Este resultado desenvolveu-se para um comportamento elástico linear, e de acordo com a fase de análise da pesquisa o polímero não apresenta linearidade, mas os dados cálculos na tabela 16 nos oferecem uma grande aproximação dos resultados correlacionados.

Estes dados serão confrontados com as tensões medidas por elementos finitos, no qual tende a ser mais preciso na leitura sobre as tensões calculadas na tabela 16, por que no programa de cálculo por elementos finitos será inserida a curva elasto-plástica do material permitindo uma maior precisão nos resultados.

No procedimento PSA AGCC\_ADTR08\_0638 adota-se 50% da tensão limite de escoamento para de aprovação das tensões de fadiga como procedimento padrão para os materiais metálicos. De acordo com PIVATO ET all (2006), na tabela 17 verifica-se que a  $10^6$  ciclos para os aços 4340 e 300M tem-se a relação entre tensão máxima em fadiga ( $S_{max}$ ) sobre o limite de escoamento ( $\sigma_e$ ) variando de 41% a 84%. Os resultados de tensão máxima em fadiga ( $S_{max}$ ) são apresentados em termos absolutos e normalizados em relação ao limite de escoamento ( $\sigma_e$ ) para cada condição.

Tabela 17: Resultados de tensão máxima em fadiga ( $S_{max}$ ) em termos absolutos e em relação ao limite de escoamento ( $\sigma_e$ ) para diferentes níveis de vida e para cada condição dos aços 4340 e 300M (PIVATO ET all, 2006).

Condição do Material	10 <sup>4</sup> ciclos		10 <sup>5</sup> ciclos		10 <sup>6</sup> ciclos		
	$S_{max}$ (MPa)	$S_{max}/\sigma_e$	$S_{max}$ (MPa)	$S_{max}/\sigma_e$	$S_{max}$ (MPa)	$S_{max}/\sigma_e$	
4340	Recozido	1.047	1,16	901	1,00	755	0,84
	IC	1.165	0,70	927	0,55	689	0,41
	IT	1.110	0,79	916	0,65	722	0,51
300M	Recozido	1.259	0,82	1.057	0,69	855	0,56
	IC	997	0,49	893	0,44	789	0,39
	IT	1.147	0,83	1.057	0,76	967	0,70

**Recozido:** tratamento por recozimento  
**IC:** tratamento intercrítico  
**IT:** tratamento isotérmico

No ensaio de ruptura por flexão pura havia o interesse de determinar a deflexão vertical que causaria uma tensão próxima ao seu limite elástico. Como este limite na poliamida e nos compósitos não apresentam um ponto definido, foi utilizado o procedimento de carregamento/tensão para 0,2% de deformação plástica do corpo de prova (Rp02). A partir do valor de Rp02 foi adotada a deflexão gerada por este carregamento. Foram então considerados 70% deste valor de deflexão, tornando-se uma boa estimativa para o início do ensaio de fadiga pelo método Staircase. Relacionando a média  $m^*$  obtida pelo método

Staircase com os valores de deflexão adotados inicialmente nos ensaio de fadiga, conforme tabela 18, verifica-se uma boa aproximação dos resultados. Por exemplo, para o caso do compósito PA 6.6 GF30 tem-se uma aproximação de 92,8%.

Tabela 18: Variação da média  $m^*$  obtida pelo método Staircase com os valores de deflexão adotados inicialmente nos ensaio de fadiga.

<b>Composito de poliamida</b>	<b><math>m^*</math> (mm)</b>	<b>RP02 (mm)</b>	<b><math>m^*/RP02</math></b>
PA 6.6 GF30	4,64	5	<b>92,8%</b>
PA 6.6 GF35	4,25	5	<b>85,0%</b>
PA 6.6 GF50	3,25	4,4	<b>73,9%</b>

#### 4.1 DETERMINAÇÃO DO LIMITE DE FADIGA ATRAVÉS DO CÁLCULO POR ELEMENTOS FINITOS

Uma vez que há similaridade entre o ensaio estático virtual e físico, oriundo da adequação das propriedades do material de cada compósito, espera-se uma correlação da tensão com cada carga-deslocamento durante o ensaio.

Aplicando-se então no modelo virtual a carga-deslocamento  $m^*$ , a tensão observada no corpo de prova virtual e na região exata de fissura observada no ensaio físico será a tensão de limite de fadiga do respectivo compósito analisado. Desta forma obtém-se para cada compósito a tensão limite para o dimensionamento de componentes.

Conseqüentemente, para chegar à correlação entre a curva de simulação e a curva experimental foi necessário construir uma caracterização elasto-plástica do material, através do processo iterativo que buscava um resultado aderente ao ensaio. Após algumas tentativas em ajustar a curva do material correlacionando-a com a curva carga-deflexão por deslocamento, foram obtida as curvas conforme as figuras 24, 25 e 26.

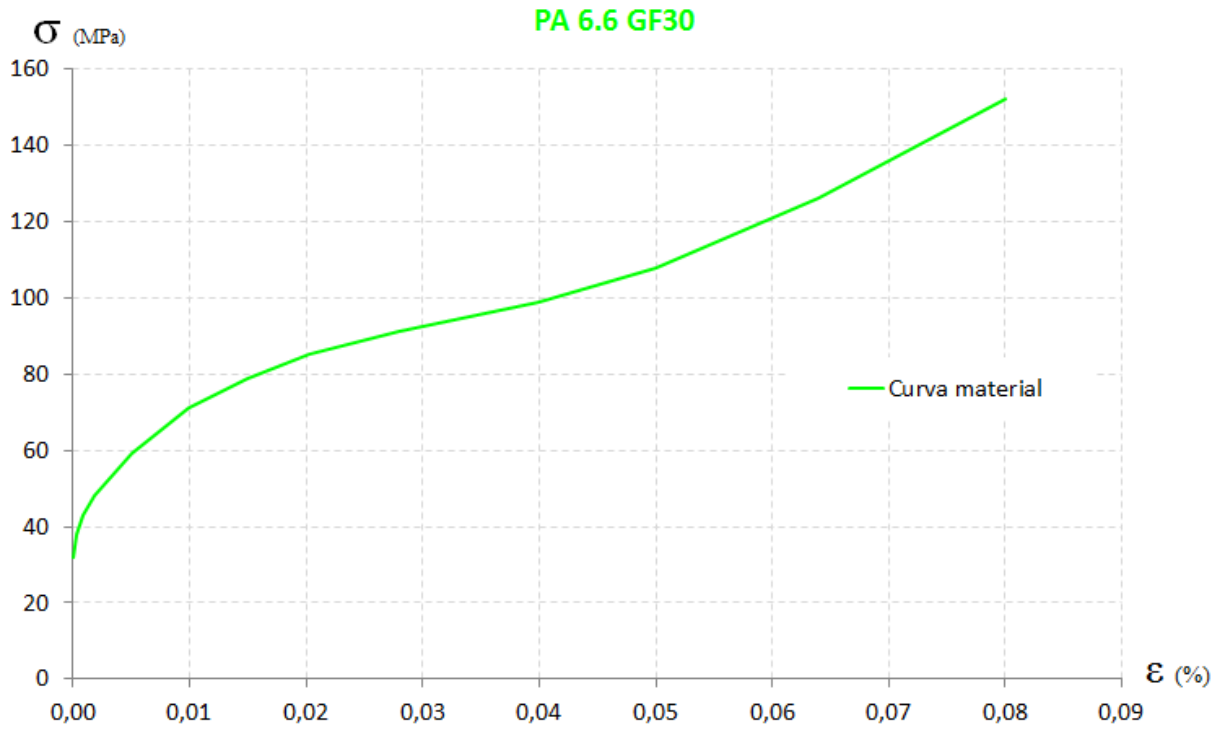


Figura 24: Curva tensão-deformação PA 6.6 GF30.

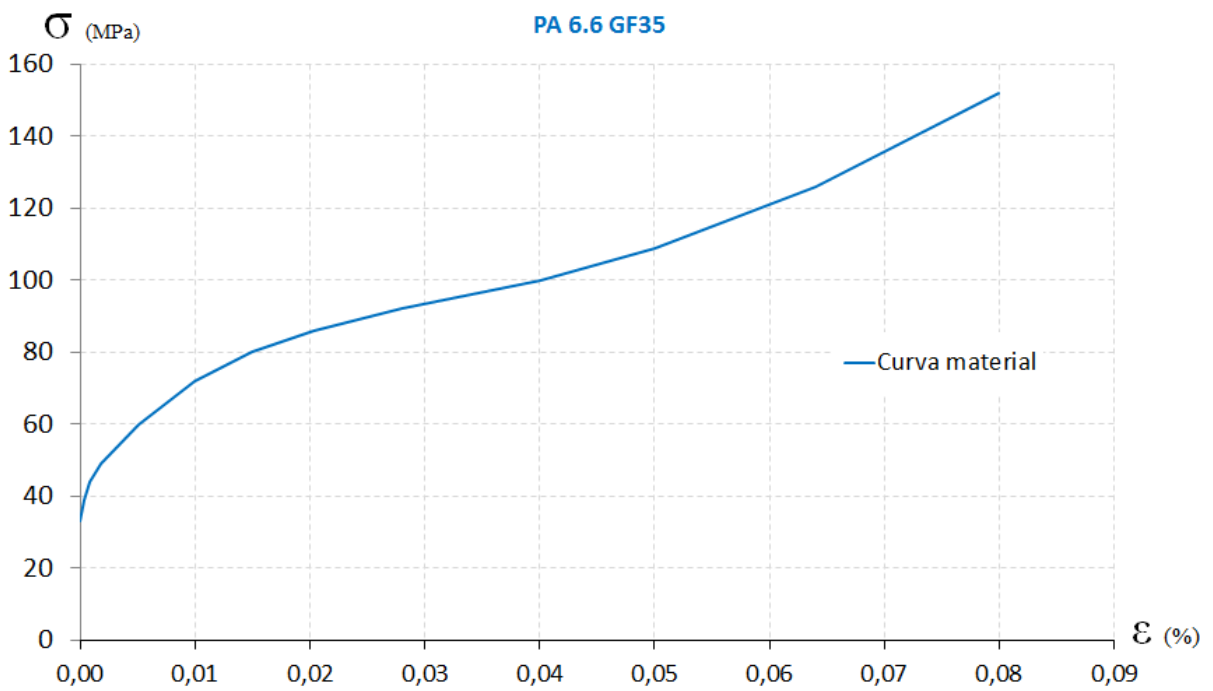


Figura 25: Curva tensão-deformação PA 6.6 GF35.

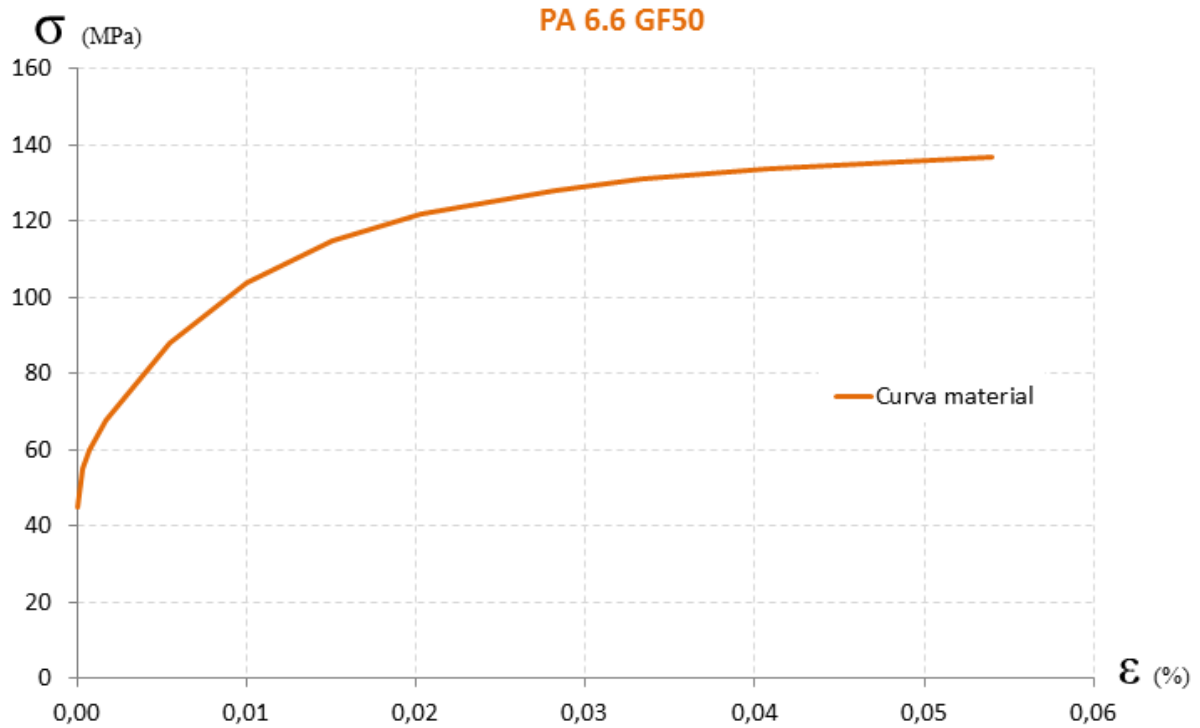


Figura 26: Curva tensão-deformação PA 6.6 GF50.

Essas curvas foram incluídas na base de dados no software ABAQUS, como nova referência de curva do material, simulando a condição aproximada da curva experimental, respeitando o erro máximo pré-estabelecido de 5%, conforme as figuras 27, 28 e 29.

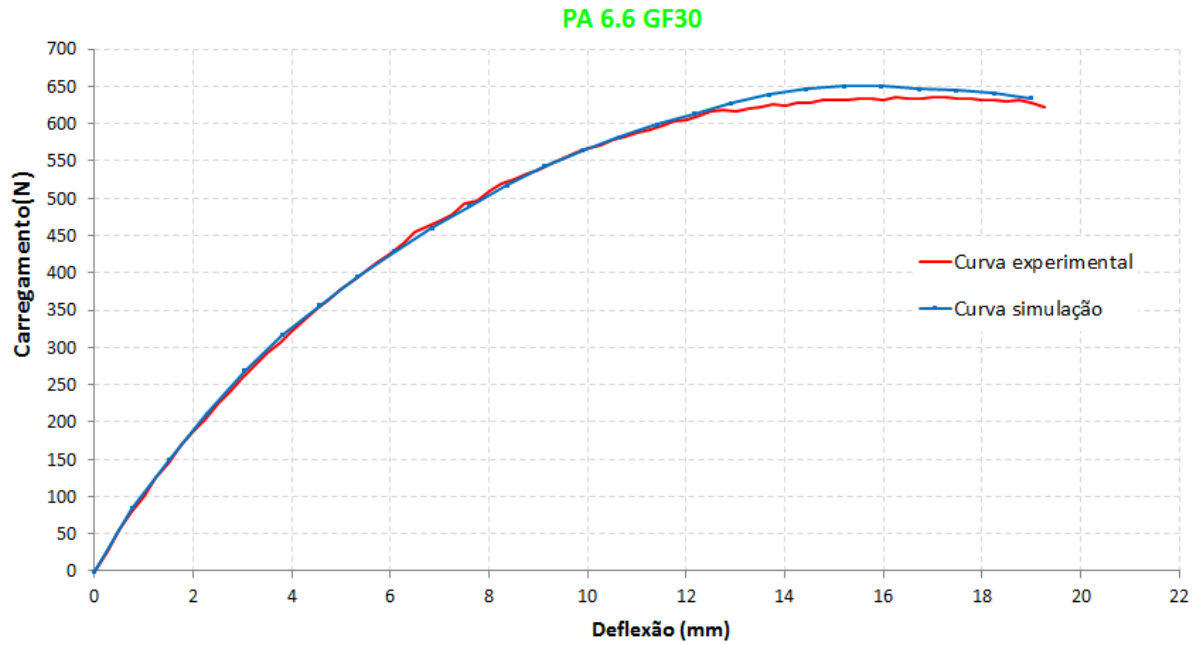


Figura 27: Curva de simulação referente ao regime plástico conforme inserida no software de elementos finitos (PA 6.6 GF30).

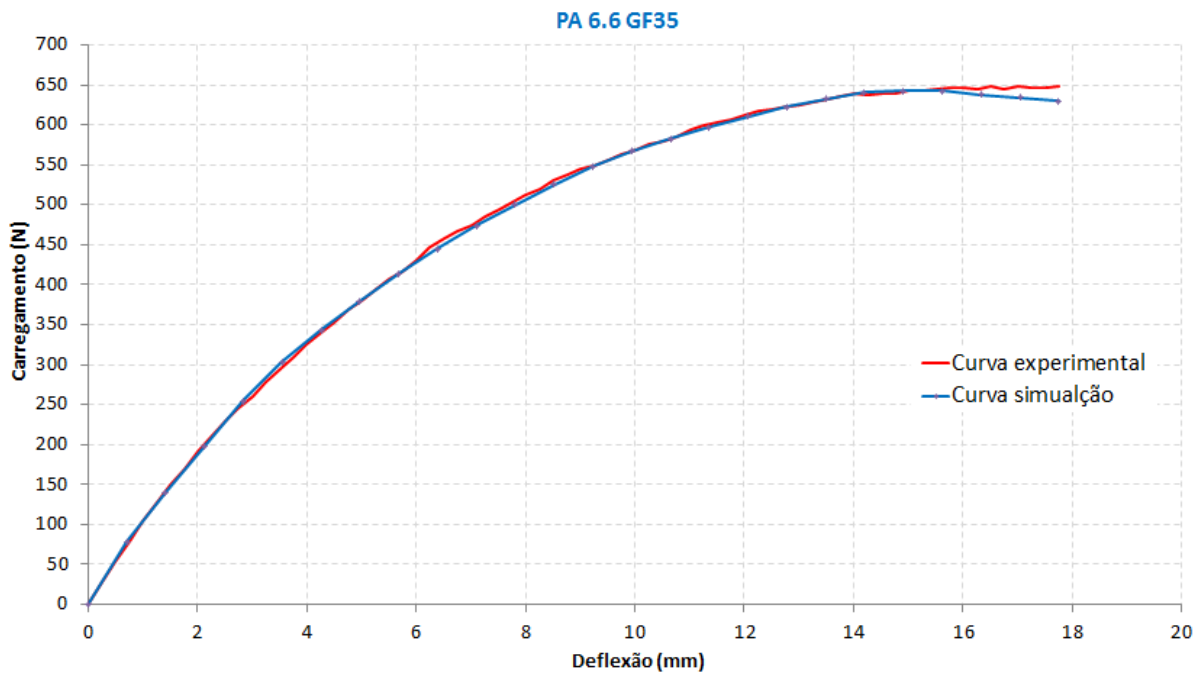


Figura 28: Curva de simulação referente ao regime plástico conforme inserida no software de elementos finitos (PA 6.6 GF35).

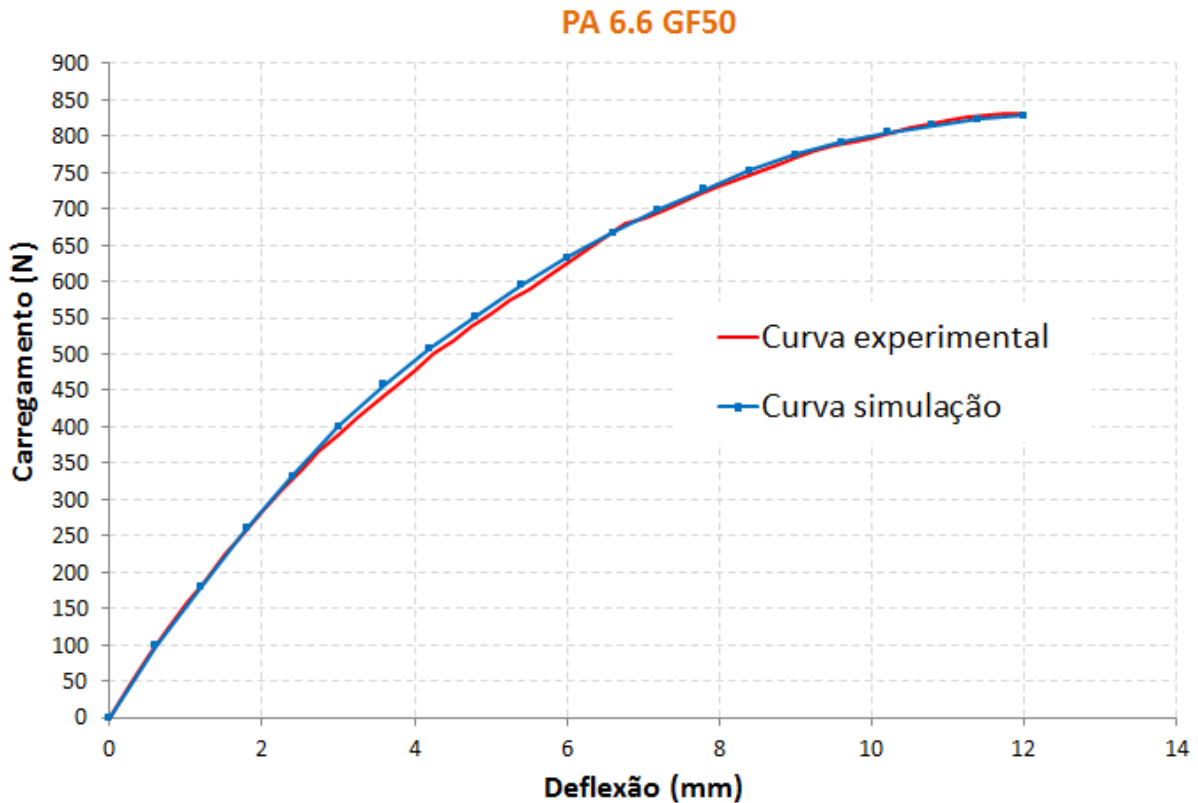


Figura 29: Curva de simulação referente ao regime plástico conforme inserida no software de elementos finitos (PA 6.6 GF50).

A curva elasto-plástica de cada compósito tem dentro de si a própria definição do  $R_{p02}$  identificados nos pontos que definem a curva tensão-deformação, possibilitando ainda a visualização da tensão correspondente à deformação plástica de 0,2%.

Este mesmo conceito de correlação carga-deflexão e tensão foram utilizados para determinação das tensões características  $R_{p02}$  (tensão limite de escoamento) e  $R_m$  (tensão limite de ruptura).

As curvas anteriores de tensão-deformação foram inseridas no banco de dados do software ABAQUS sendo utilizadas como a curva de caracterização do material analisado. Desta forma passa-se a ter o corpo de provas devidamente calibrado com as propriedades dos materiais ensaiadas fisicamente.

Simulando virtualmente o corpo de provas através do método de elementos finitos, utilizando as mesmas condições do ensaio físico, como, o mesmo ponto de aplicação do carregamento-deflexão, e os mesmos pontos de apoio do corpo de provas do dispositivo utilizado no ensaio físico, aplica-se o carregamento-deflexão  $m^*$  conforme figura 30.



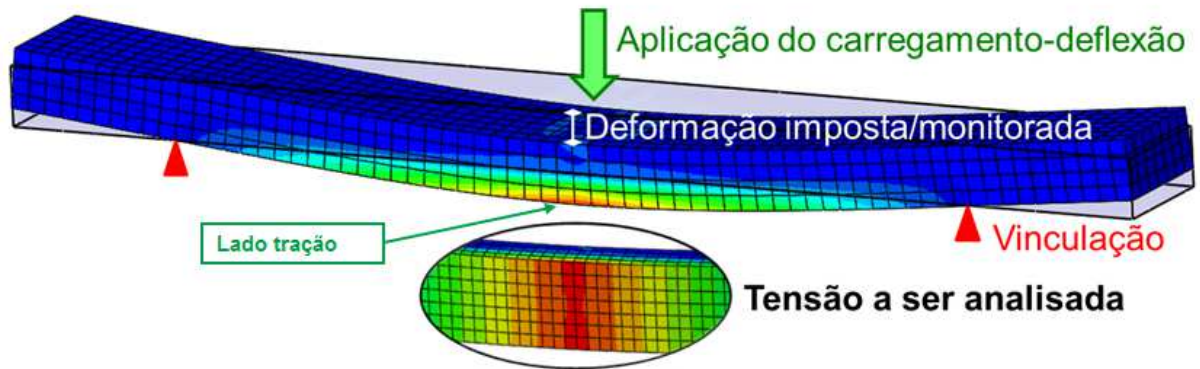


Figura 30: Esquema de aplicação do carregamento-deflexão  $m^*$  no corpo de provas pelo método de elementos finitos.

A seguir as figuras 31, 32 e 33 mostram a tensão limite de acordo com o carregamento-deflexão imposto para cada corpo de prova caracterizado pela sua respectiva curva correlacionada e parametrizada entre físico e virtual.

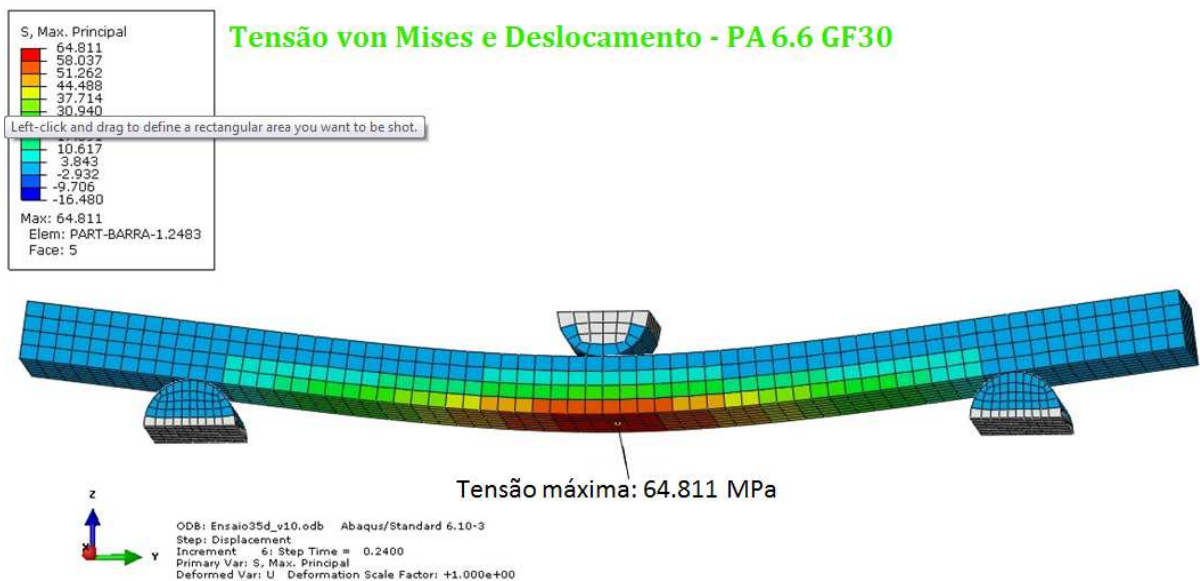


Figura 31: Resultado da aplicação do carregamento-deflexão correlato a curva física-virtual (PA 6.6 GF30).

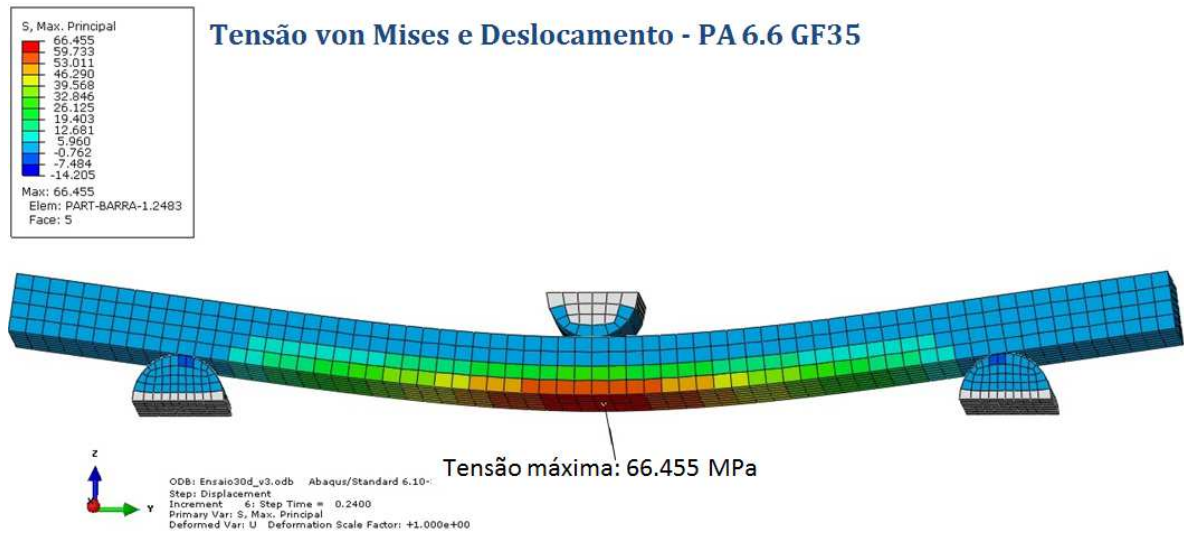


Figura 32: Resultado da aplicação do carregamento-deflexão correlato a curva física-virtual (PA 6.6 GF35).

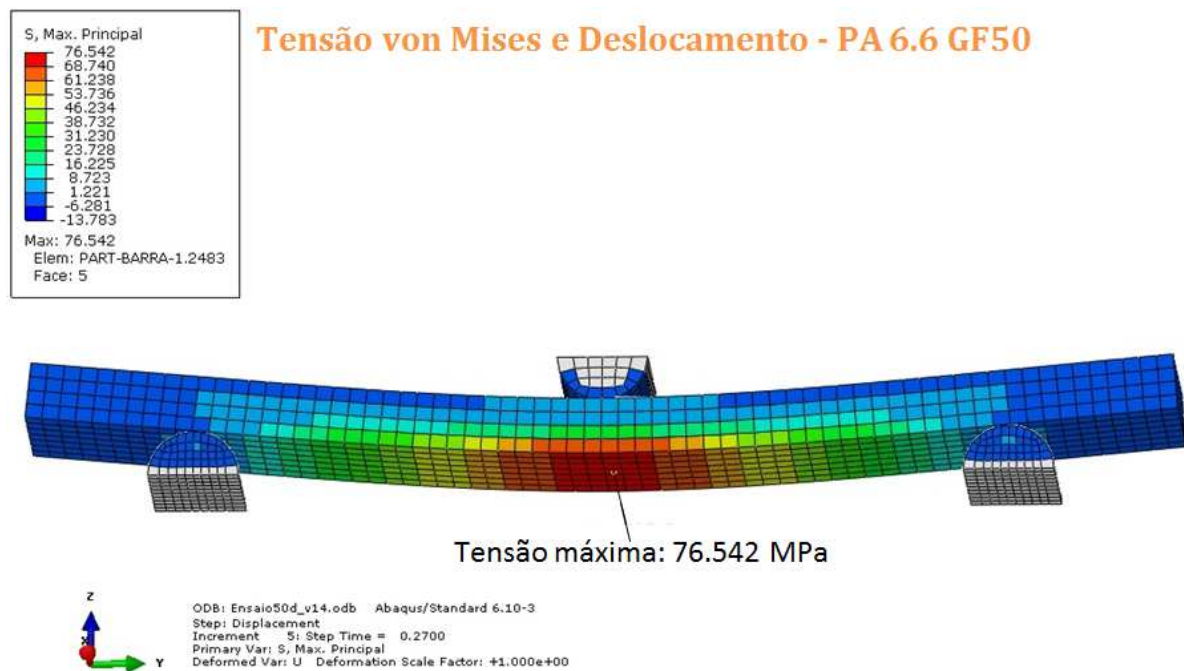


Figura 33: Resultado da aplicação do carregamento-deflexão correlato a curva física-virtual (PA 6.6 GF50).

Com o corpo de prova virtual caracterizado, utilizando os valores de ruptura das curvas apresentadas nas figuras 31, 32 e 33, foi possível determinar o valor de tensão de ruptura para cada compósito utilizando o mesmo método para definir o limite de fadiga, pois o ponto de leitura de ruptura da curva fornece-nos dados de força por deslocamento. Quando aplicada no corpo de provas, gera a tensão de ruptura no mesmo ponto de leitura do corpo de

provas utilizado para o limite de fadiga. Este dado tem como objetivo estabelecer o limite de validação para os cálculos de elementos finitos de esforços máximos e esforços excepcionais.

As simulações foram realizadas para os compósitos de poliamida GF30, GF35 e GF50 e os resultados das tensões do limite de fadiga e tensão de ruptura estão representados na tabela 19 a seguir.

Tabela 19: Tensões limites oriundas dos ensaios experimentais para fadiga, limite elástico e limite de ruptura.

Tensões limites	Limite de Fadiga	Limite Elástico ( $R_e$ )	Limite de Ruptura ( $R_m$ )
PA 6.6 GF30	64,81 MPa	69,30 MPa	130,00 MPa
PA 6.6 GF35	66,46 MPa	70,40 MPa	131,00 MPa
PA 6.6 GF50	76,54 MPa	97,30 MPa	139,00 MPa

O cálculo de elementos finitos tem sua precisão correlacionada à caracterização fidedigna da real curva de material e suas respectivas condições de contorno, portanto, as curvas tensão-deformação obtidas nesta pesquisa representam uma condição embasada experimentalmente para garantir um resultado preciso para qualquer análise estrutural necessária para os compósitos em questão.

#### 4.2 ANÁLISE DE MICROSCOPIA ELETRÔNICA POR VARREDURA

A fratura por fadiga dos corpos de prova apresentou superfícies diferentes em virtude da variação do percentual de fibra de vidro no compósito de poliamida. Foi possível verificar duas situações esperadas em relação ao rompimento das fibras e o deslocamento das mesmas devido aos esforços cíclicos aplicados nos corpos de prova. Nas figuras 34, 35 e 36 são apresentadas as superfícies de fratura dos compósitos com concentrações de fibra de vidro de 30, 35 e 50%, respectivamente. De acordo com estas figuras é possível verificar a quebra da fibra de vidro e também o descolamento da fibra de vidro da poliamida, ocasionando cavidades oriundas dos esforços cíclicos aplicados.

Uma observação mais detalhada realizada nas superfícies de fratura dos compósitos evidenciou a excelente aderência da poliamida na fibra de vidro, como pode ser

notado na figura 37. É possível visualizar nesta figura uma grande quantidade de poliamida sobre toda a extensão da fibra de vidro.

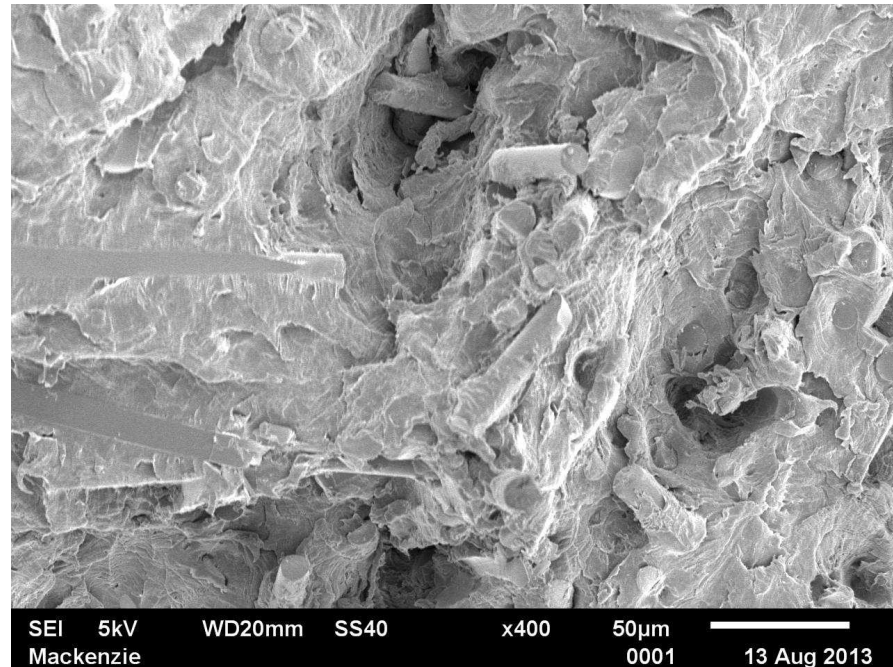


Figura 34: Superfície de fratura observada por microscopia eletrônica de varredura do corpo de prova PA 6.6 GF30 fraturado em ensaio de fadiga.

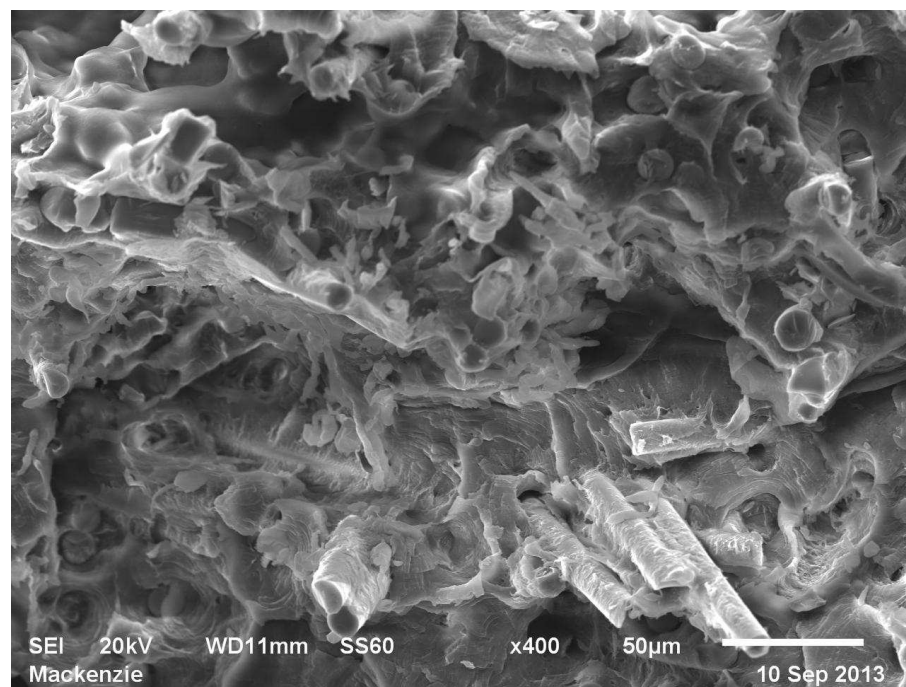


Figura 35: Superfície de fratura observada por microscopia eletrônica de varredura do corpo de prova PA 6.6 GF35 fraturado em ensaio de fadiga.

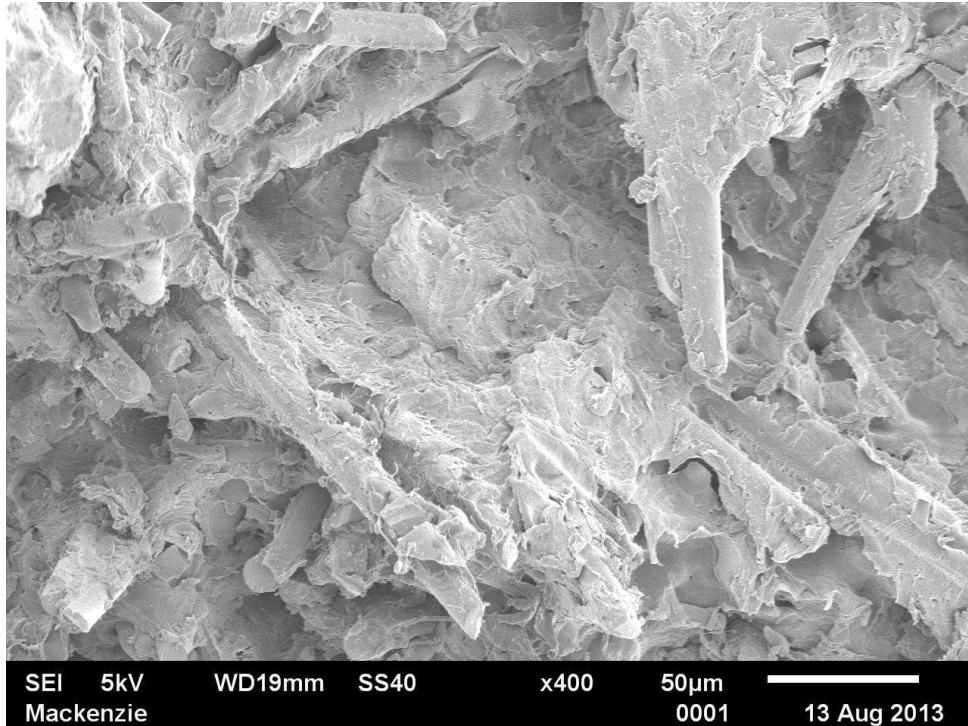


Figura 36: Superfície de fratura observada por microscopia eletrônica de varredura do corpo de prova PA 6.6 GF50 fraturado em ensaio de fadiga.

Para o estudo detalhado da fratura por fadiga, foi realizada a análise por microscopia eletrônica de varredura da superfície fraturada nas regiões tracionadas e comprimida dos corpos de prova dos compósitos com concentrações de fibra de vidro de 30, 35 e 50%. Estas imagens podem ser observadas nas Figuras 38, 39 e 40, respectivamente. Um aspecto que pode ser observado é a superfície de fratura da poliamida que parece ter regiões mais planas na zona tracionada dos corpos de prova ensaiados em fadiga.



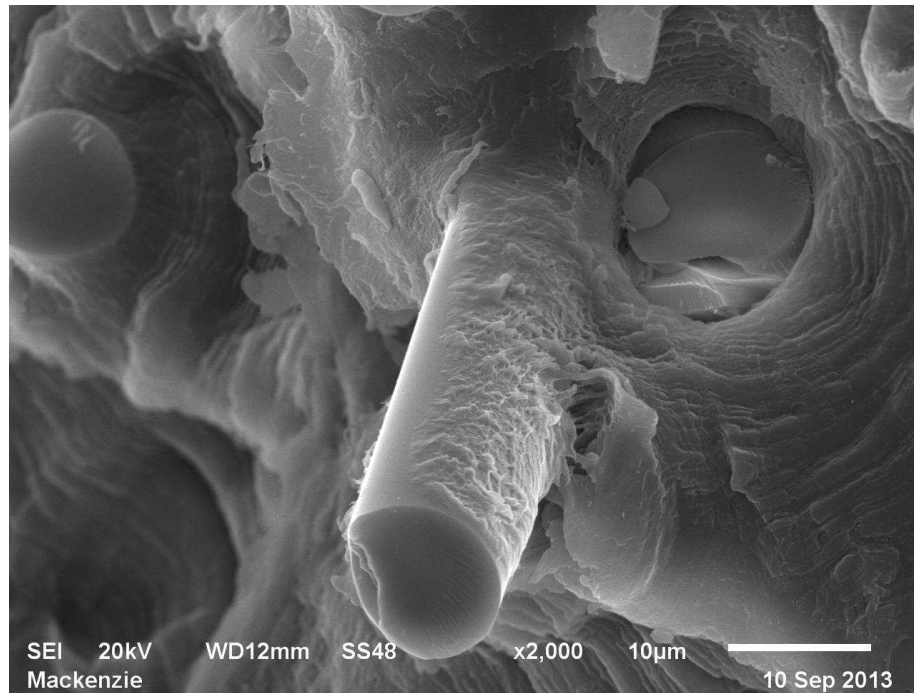


Figura 37: Detalhe da superfície de fratura observada por microscopia eletrônica de varredura do corpo de prova do compósito PA 6.6 GF35, mostrando a aderência da poliamida na fibra de vidro.

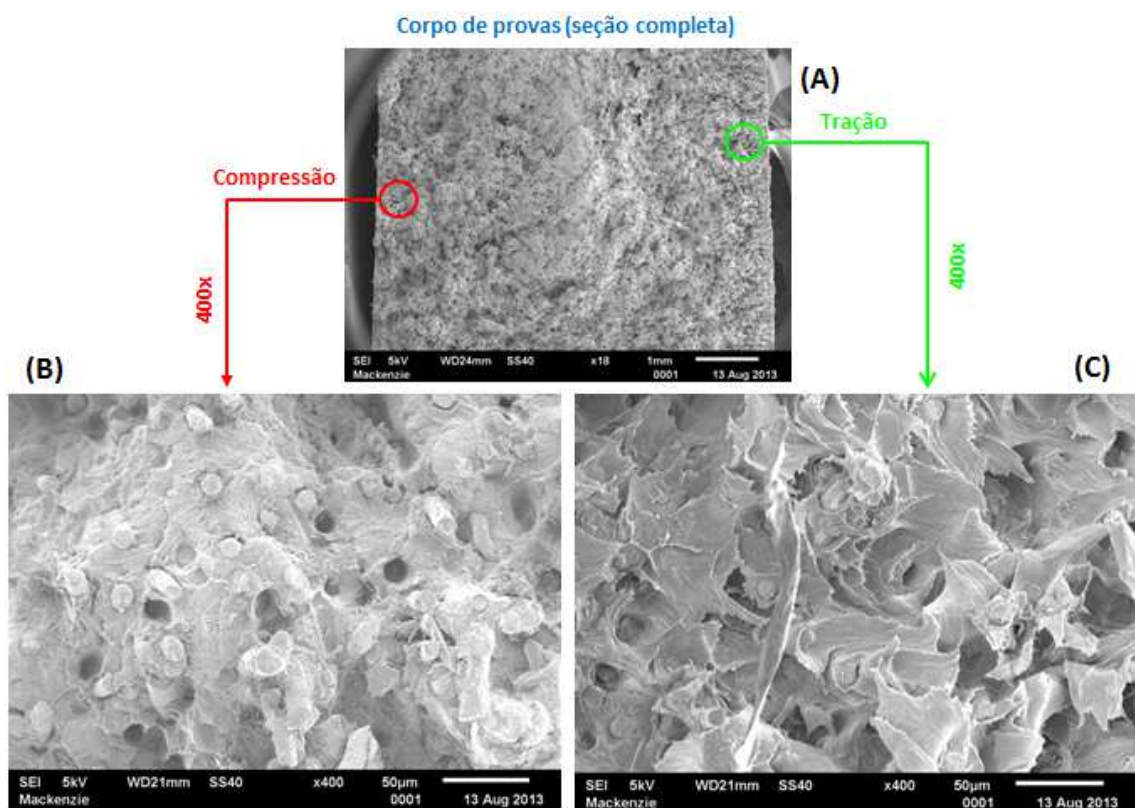


Figura 38: Superfície de fratura observada por microscopia eletrônica de varredura do corpo de prova PA 6.6 GF30 fraturado em ensaio de fadiga, evidenciando a zona tracionada e comprimida do corpo de prova.

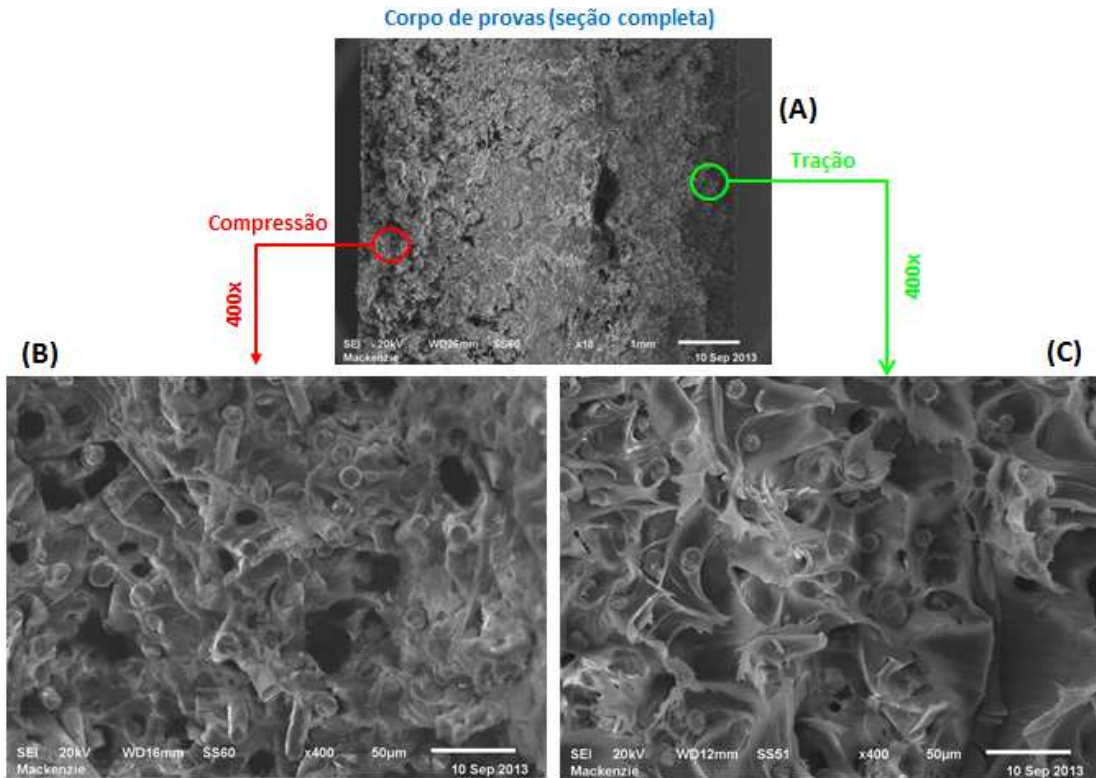


Figura 39: Superfície de fratura observada por microscopia eletrônica de varredura do corpo de prova PA 6.6 GF35 fraturado em ensaio de fadiga, evidenciando a zona tracionada e comprimida do corpo de prova.

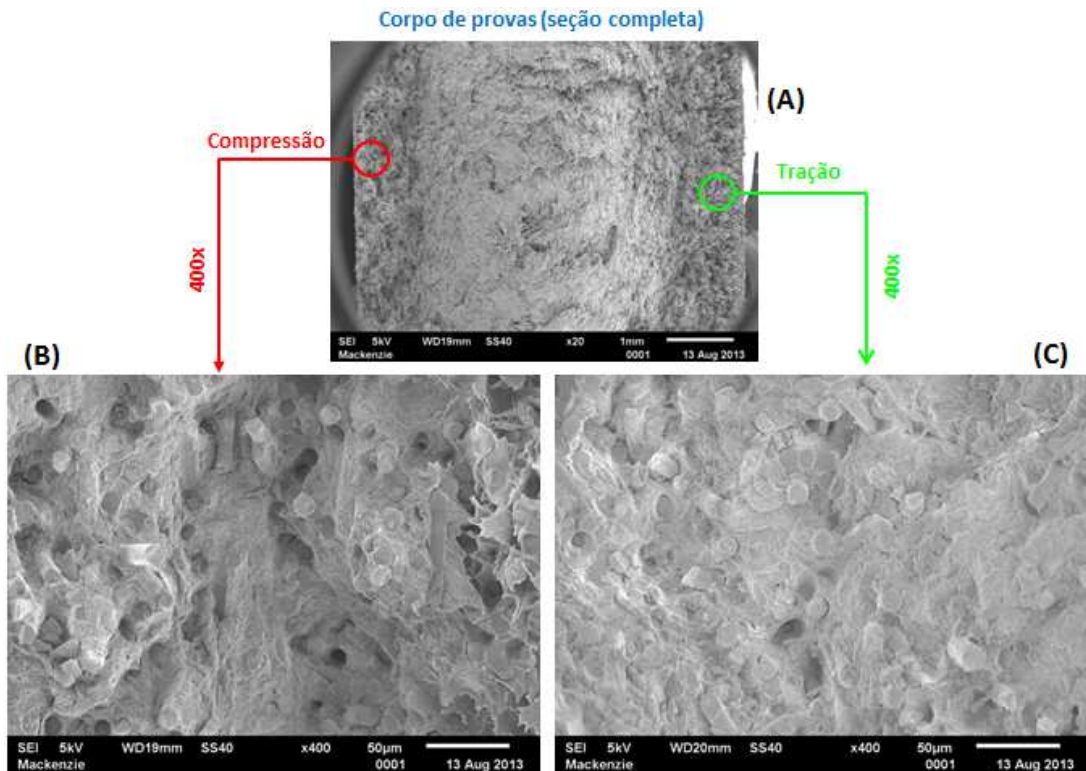


Figura 40: Superfície de fratura observada por microscopia eletrônica de varredura do corpo de prova PA 6.6 GF50 fraturado em ensaio de fadiga, evidenciando a zona tracionada e comprimida do corpo de prova.

Na figura 41 pode ser observado em detalhe o rompimento da fibra de vidro decorrente do ciclo de fadiga que o compósito foi submetido.

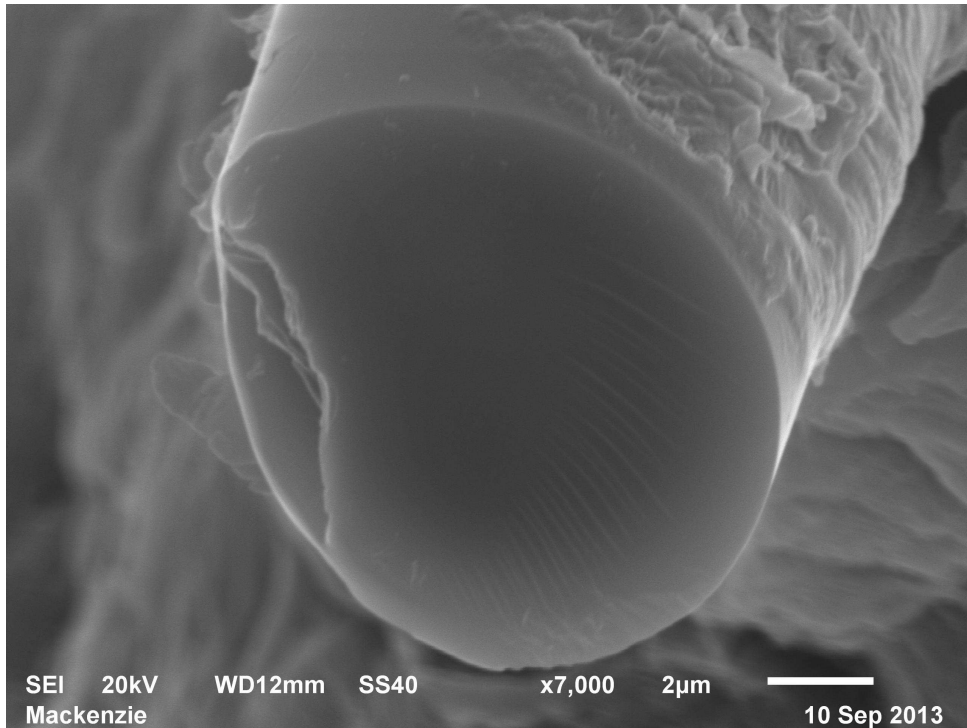


Figura 41: Detalhe da superfície de fratura de uma fibra do corpo de prova do compósito PA 6.6 GF30.

Nas figuras 42, 43 e 44 são observadas superfícies de fratura dos compósitos estudados. A injeção dos corpos de prova foi realizada sem a perspectiva de que as fibras de vidro ficassem alinhadas no sentido de aplicação do carregamento dos corpos de prova. Esta condição desprivilegiada de dispersão das fibras, como pode ser melhor observada na figura 42, mostra que as propriedades em fadiga poderiam ser maiores, caso as fibras de vidro estivessem alinhadas no sentido de aplicação dos carregamentos. Portanto, os resultados de fadiga obtidos pelos ensaios apresentam valores seguros para serem aplicados nos cálculos estruturais.

A poliamida 6.6 sem fibra de vidro não foi possível analisar sua superfície de fratura, devido à mesma não ter apresentado fratura em todos os ensaios realizados.



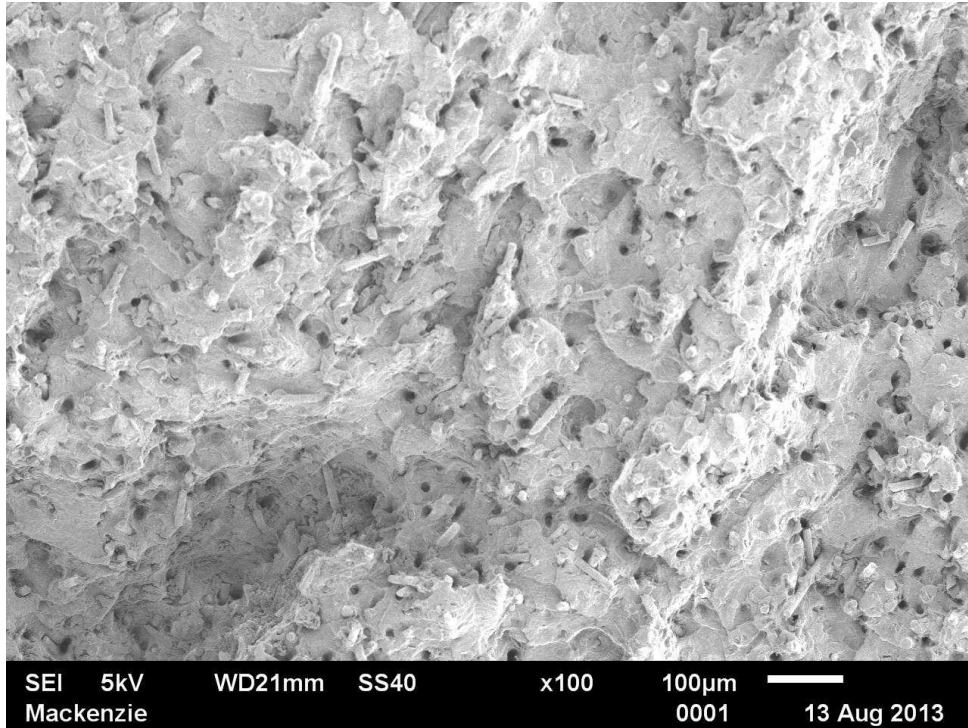


Figura 42: Superfície de fratura observada por microscopia eletrônica de varredura do corpo de prova do compósito PA 6.6 GF30.

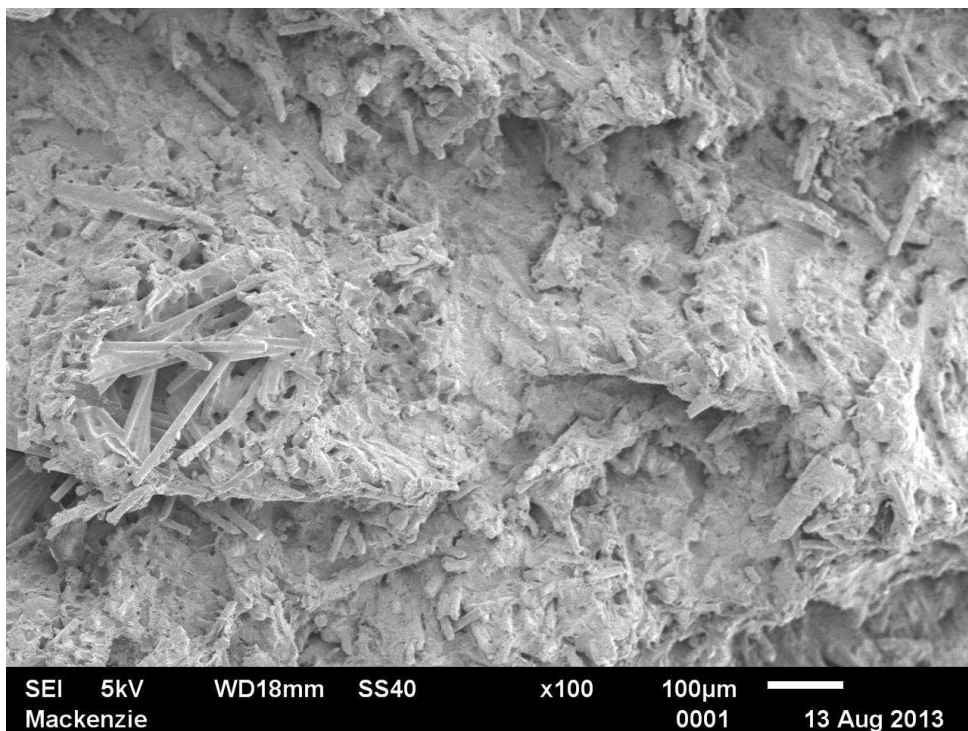


Figura 43: Superfície de fratura observada por microscopia eletrônica de varredura do corpo de prova do compósito PA 6.6 GF50.

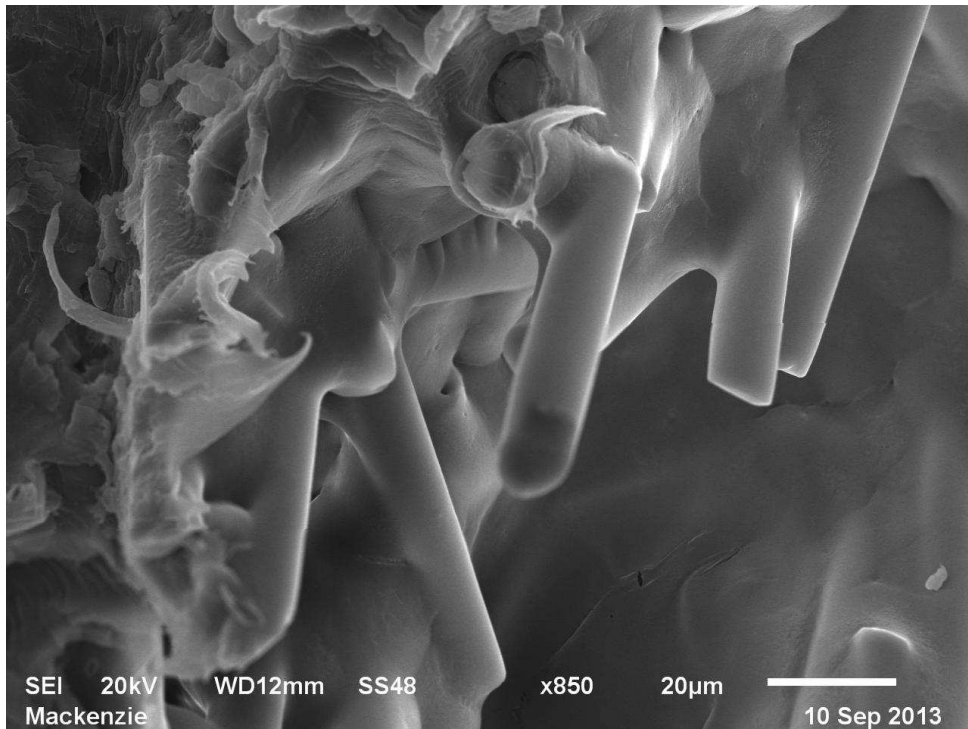


Figura 44: Superfície de fratura observada por microscopia eletrônica de varredura do corpo de prova do compósito PA 6.6 GF35.

#### 4.3 CÁLCULO POR ELEMENTOS FINITOS DA CARCAÇA EM COMPÓSITO DE POLIAMIDA COM FIBRA DE VIDRO

O projeto da carcaça em compósito de poliamida baseou-se inicialmente na geometria já existente do coxim motor com carcaça de metal utilizado nos veículos para motorização 1400 e 1600 cilindradas. Este ponto de partida nos permite manter dimensões já definidas em projeto que no caso de uma concepção do produto totalmente nova demandaria cálculos de dimensionamento para adequação do corpo elastômero, incluindo batentes laterais, batente vertical, dimensão do inserto de montagem do suporte metálico de sustentação do motor, ângulo das pernas de borracha, etc.

A figura 45 mostra a geometria definida para análise de resistência aos esforços de fadiga, máximos e excepcionais dos compósitos de poliamida.

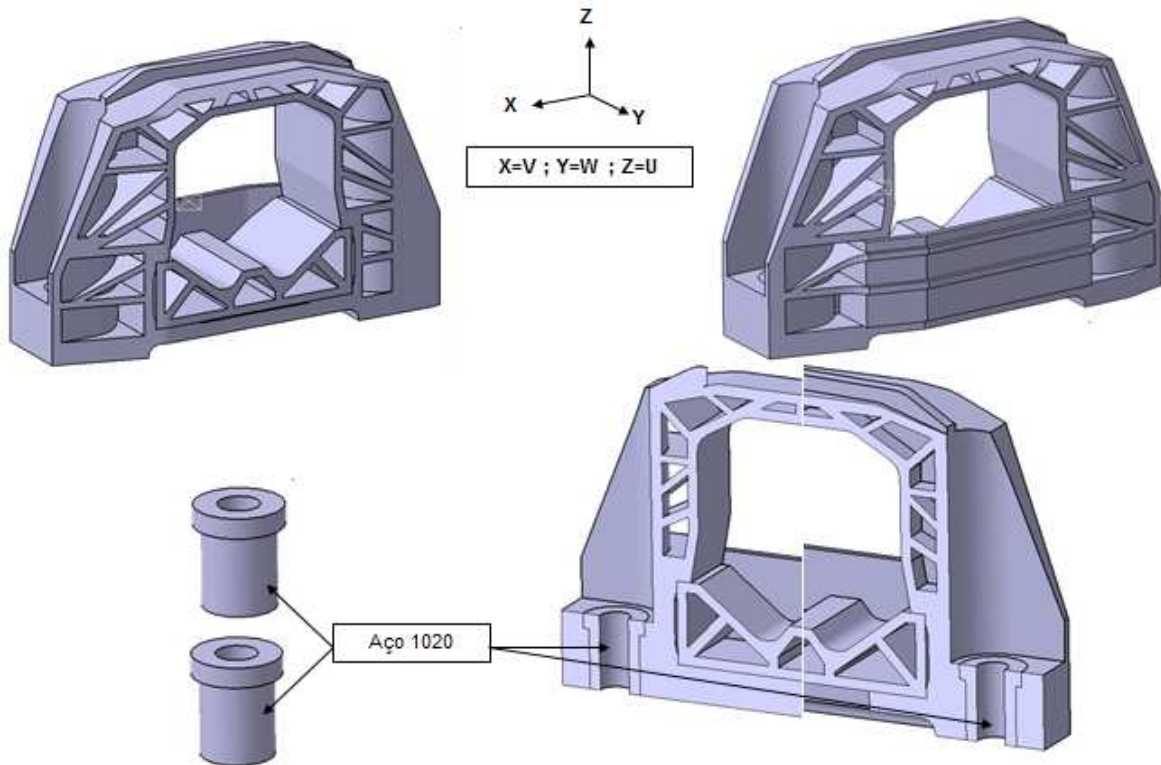


Figura 45: Geometria definida para aplicação do compósito de poliamida em substituição da liga de alumínio.

As regiões de fixação da carcaça em compósito de poliamida foram consideradas com inserto de aço 1020 contemplando as dimensões de assentamento do parafuso M10x1,5 com um torque de aperto previsto de 60 Nm com a tolerância de +/- 10%.

O compósito de poliamida não possui propriedades de atrito adequadas para fixações a serem realizadas diretamente sobre sua superfície, e nem de tenacidade para resistência a um torque de aperto para fixações de segurança.

As análises sobre os carregamentos nas respectivas variáveis permitem verificar a resistência dos compósitos de poliamida em diferentes situações de carregamento e validações estruturais. Os níveis de tensão limitam-se aos expostos na tabela 20, que utilizam as tensões expressas na tabela 19 aplicando como critério de validação para os ensaios de fadiga, esforços máximos e esforços excepcionais.

Tabela 20: Critério de validação para análise de elementos finitos para fadiga, esforços máximos e esforços excepcionais.

Critério de aprovação	Limite de Fadiga (MPa)	$R_e$ Esforços máximos (MPa)	$R_m$ Esforços excepcionais (MPa)
PA 6.6 GF30	64,81	69,30	130,00
PA 6.6 GF35	66,46	70,40	131,00
PA 6.6 GF50	76,54	97,30	139,00

Outra análise por elementos finitos, que possibilita visualizar a diferença estrutural em máximo deslocamento entre os compósitos de poliamida, é a aplicação dos carregamentos medindo sua deflexão conforme as figuras anteriores demonstraram. Esta análise utiliza a mesma metodologia da aplicação dos carregamentos para verificar sua resistência estrutural quanto ao limite de tensão, sendo aplicada individualmente em cada direção (X, Y e Z), que o suporte sofre carregamentos em sua vida útil. Os resultados obtidos na análise de deflexão representada em todas as figuras que ilustram as análises por elementos finitos, demonstram resultados comparáveis aos de SILVA ET all (2012), onde os compósitos de poliamida GF30 e GF35 obtiveram maiores deflexão em relação ao compósito de poliamida GF50.

Estes resultados mostram que o compósito de poliamida GF50 apresenta deflexões mais favoráveis em relação aos compósitos de poliamida GF30 e GF35, comparado aos metais apresenta maior tenacidade.

A seguir os resultados do cálculo por elementos finitos para os esforços de fadiga conforme figuras 46 a 49.



Figura 46: Análise por elementos finitos carcaça PA 6.6 (fadiga X+).



Figura 47: Análise por elementos finitos carcaça PA 6.6 (fadiga X-).



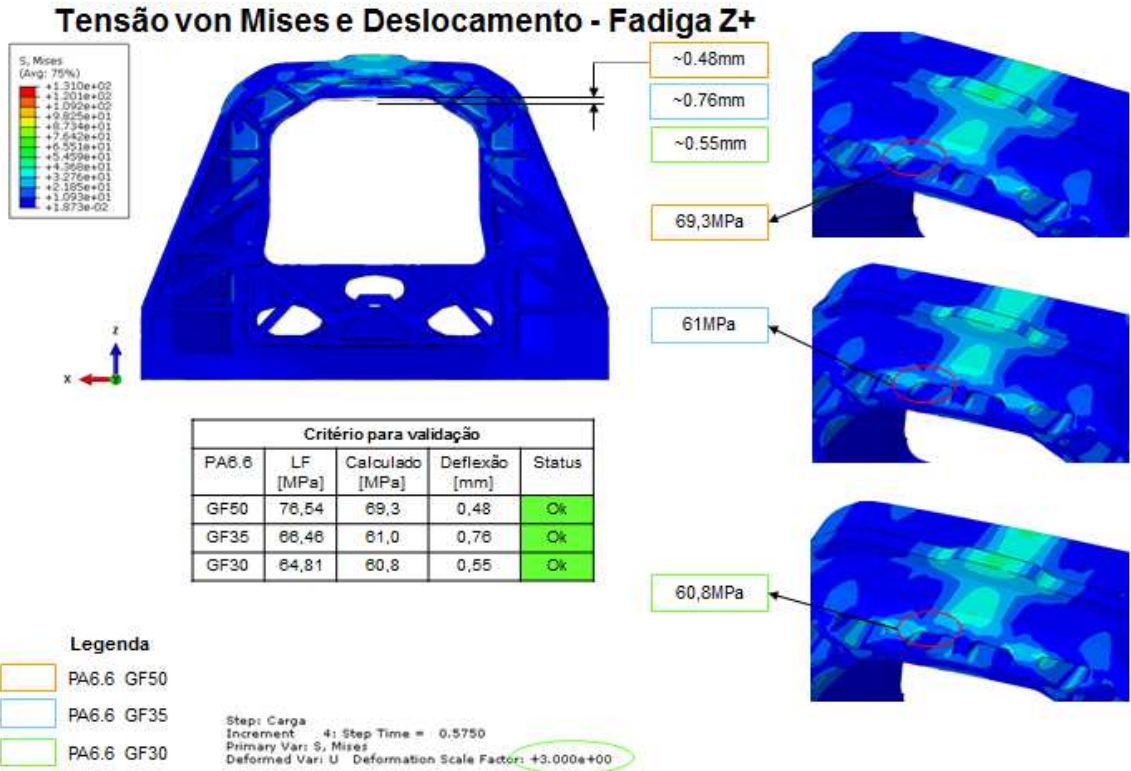


Figura 48: Análise por elementos finitos carcaça PA 6.6 (fadiga Z+).

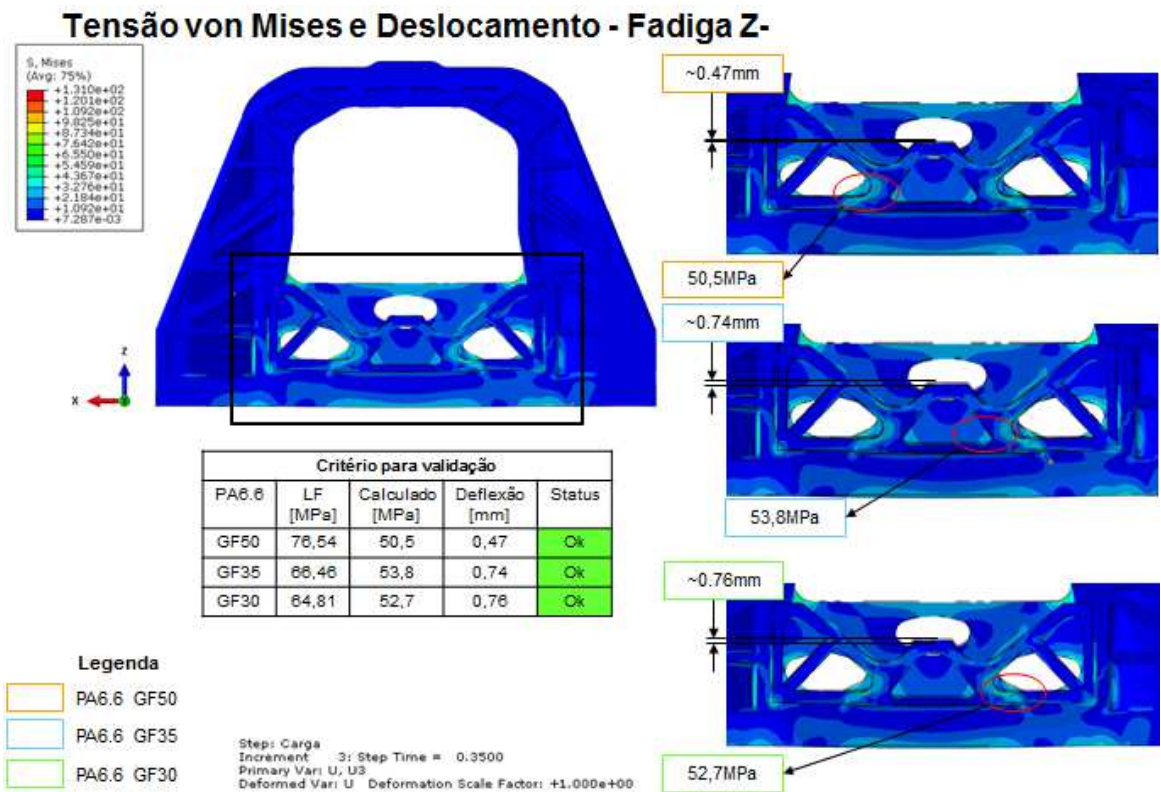


Figura 49: Análise por elementos finitos carcaça PA 6.6 (fadiga Z-).

Os resultados mostram que para geometria desenvolvida, os maiores níveis de tensão encontrados para o eixo X estão em torno de 45% do limite de fadiga, caracterizando o resultado positivo. No eixo Z os resultados foram positivos, porém com os níveis de tensão mais próximos ao limite de fadiga em aproximadamente 1% menor referente ao critério de aprovação, indicando a relevância dos esforços de fadiga submetidos em relação à geometria do suporte.

A deflexão do suporte sobre aplicação dos carregamentos de fadiga apresentam valores semelhantes comparados aos resultados apresentados do eixo de X+ por SILVA ET all (2012), apresentando uma diferença nos resultados de tensão para cada compósito de poliamida de aproximadamente 10% menor. Esta pequena diferença pode estar associada a não utilização da curva do material experimental para análise por elementos finitos, o que em outras direções de aplicação de carregamento podem apresentar diferenças percentuais maiores.

Para os esforços máximos foram analisados os carregamentos em todas as direções (X, Y e Z), onde obtivemos as respectivas aprovações. A seguir à análise dos esforços máximos conforme as figuras 50 a 54.



Figura 50: Análise por elementos finitos carcaça PA 6.6 (esforços máximos X+).



Figura 51: Análise por elementos finitos carcaça PA 6.6 (esforços máximos X-).



Figura 52: Análise por elementos finitos carcaça PA 6.6 (esforços máximos Y+).



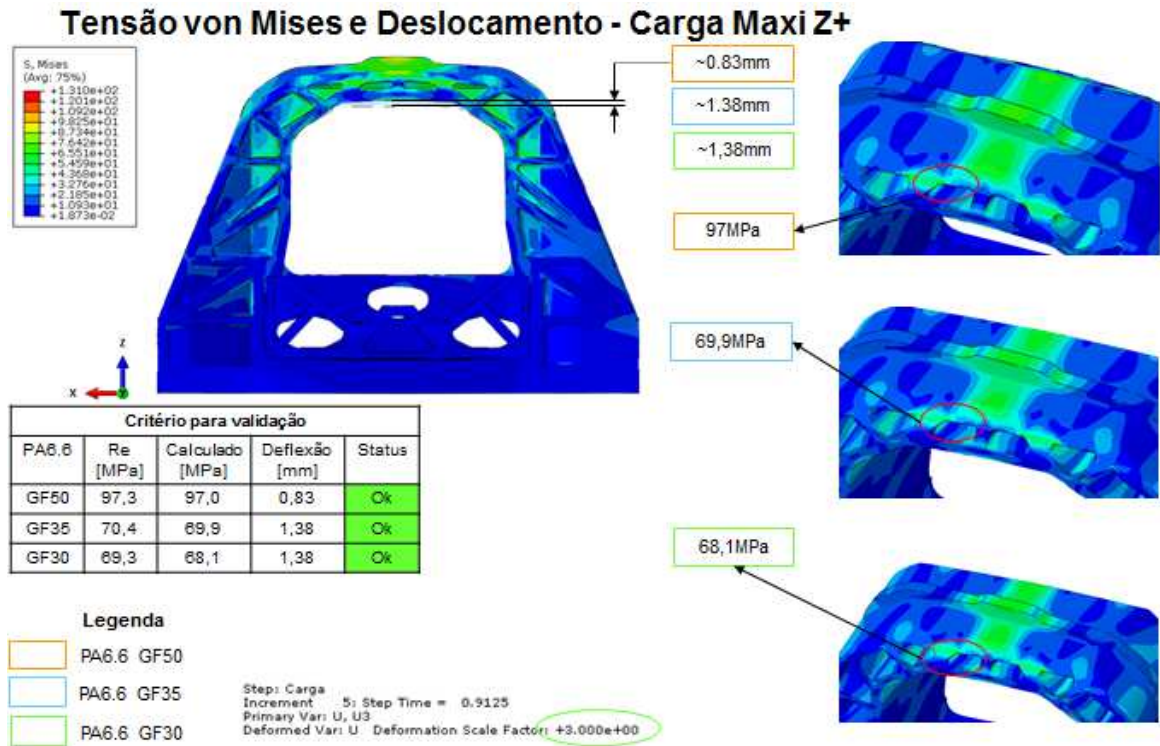


Figura 53: Análise por elementos finitos carcaça PA 6.6 (esforços máximos Z+).

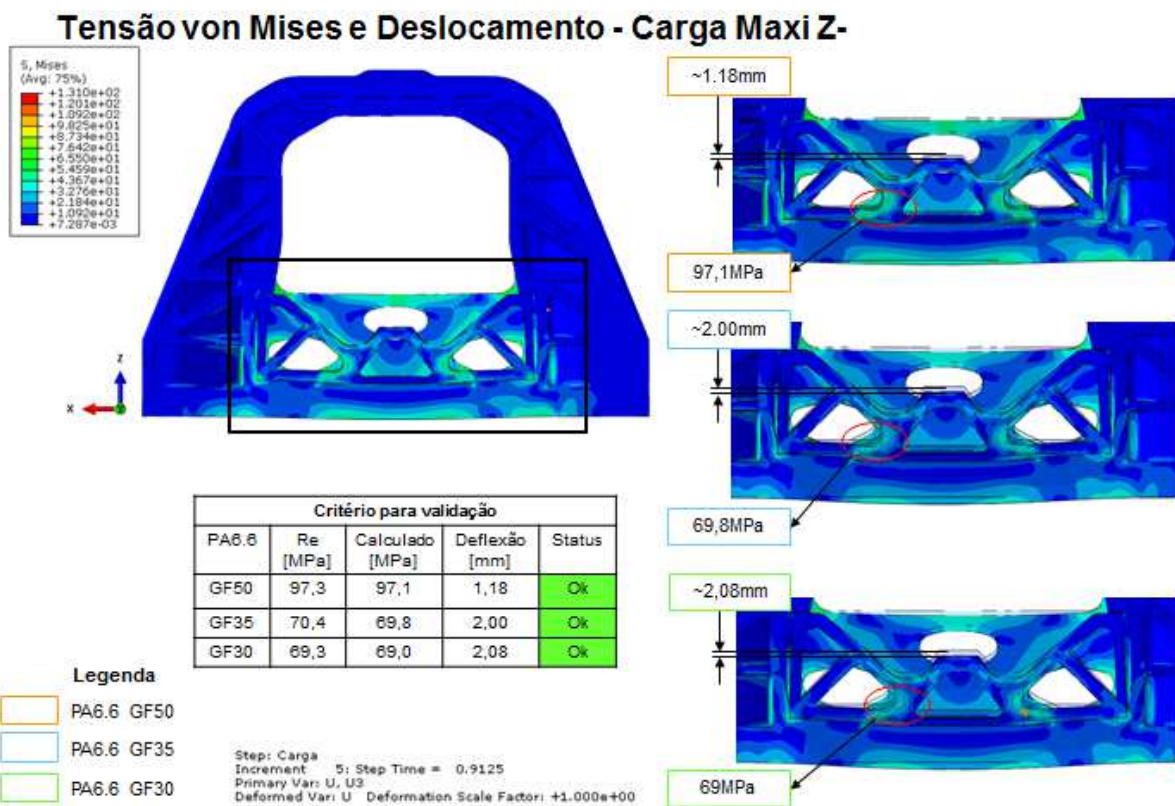


Figura 54: Análise por elementos finitos carcaça PA 6.6 (esforços máximos Z-).

Os resultados das tensões dos esforços máximos para o eixo de X apresentaram resultados positivos com aproximadamente 30% menor do valor de tensão limite. Para o eixo Y os resultados foram positivos com valores de tensão de aproximadamente 20% menor a tensão limite para cada variável. Para o eixo Z os resultados foram positivos, porém apresentaram valores de tensão inferiores a 1% do critério de aprovação, mostrando uma grande proximidade a tensão limite.

Para os esforços excepcionais foram analisados em todas as direções (X, Y e Z), em todas as direções obtivemos as respectivas aprovações. A seguir as figuras 55 a 59 mostram os resultados dos cálculos por elementos finitos.

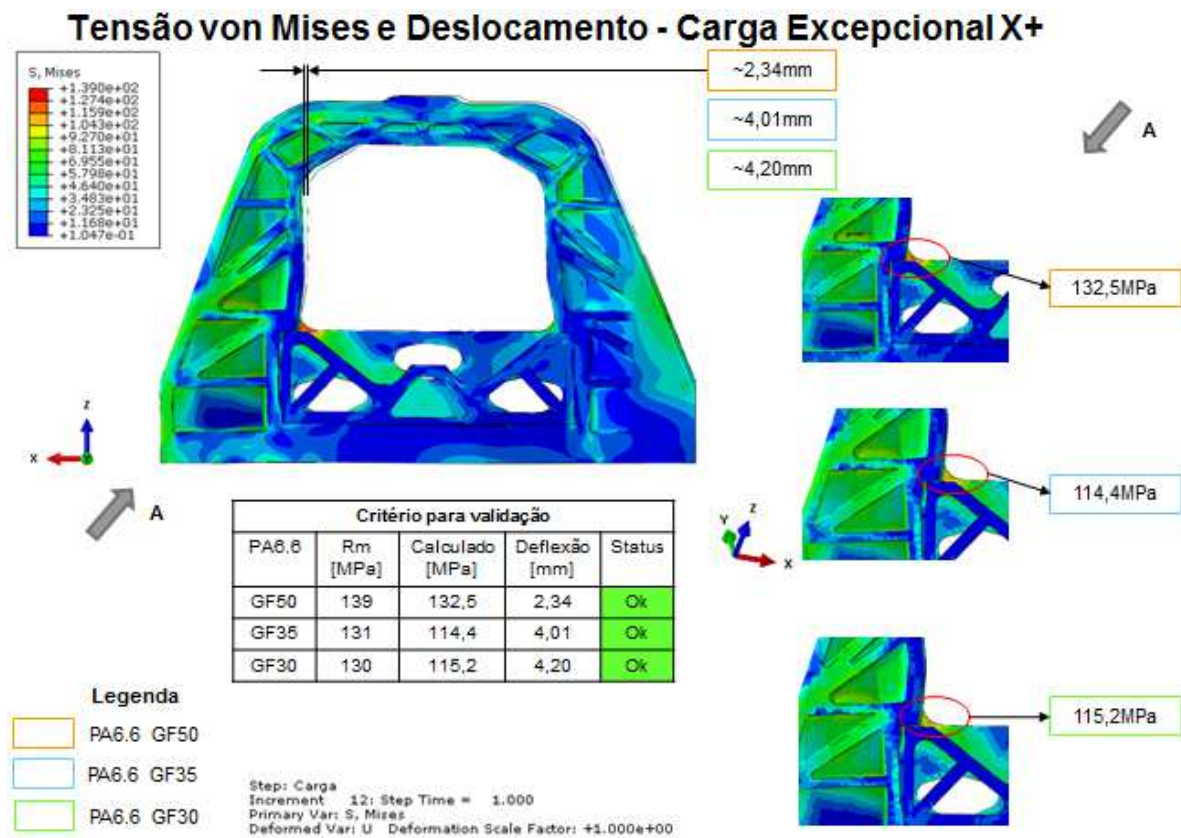


Figura 55: Análise por elementos finitos carcaça PA 6.6 (esforços excepcionais X+).

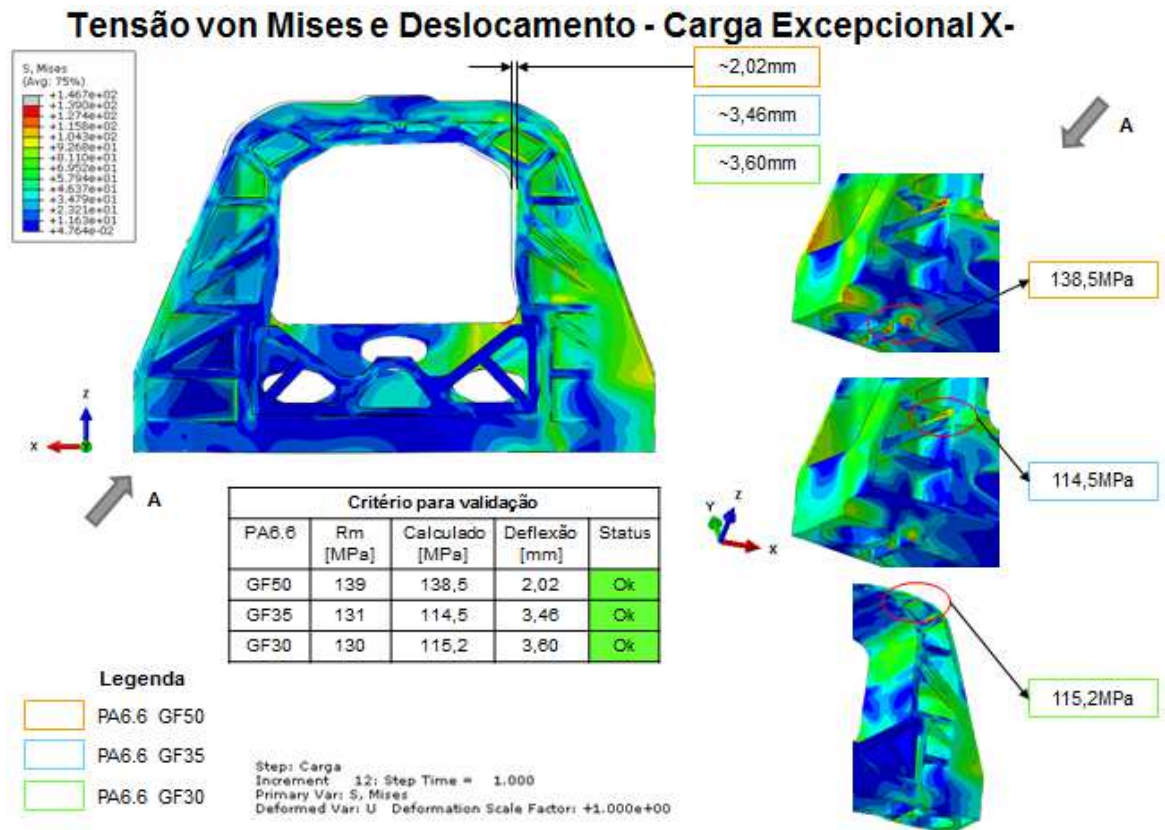


Figura 56: Análise por elementos finitos carcaça PA 6.6 (esforços excepcionais X-).



Figura 57: Análise por elementos finitos carcaça PA 6.6 (esforços excepcionais Y+).



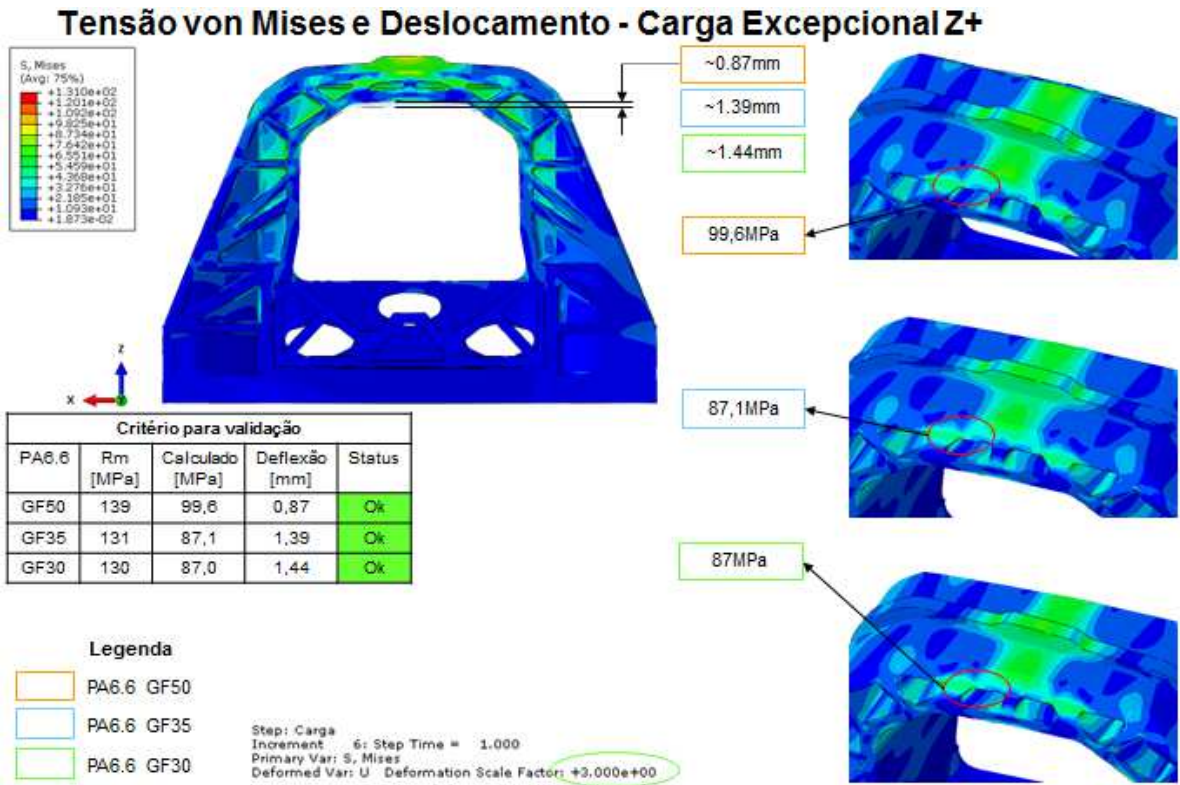


Figura 58: Análise por elementos finitos carcaça PA 6.6 (esforços excepcionais Z+).

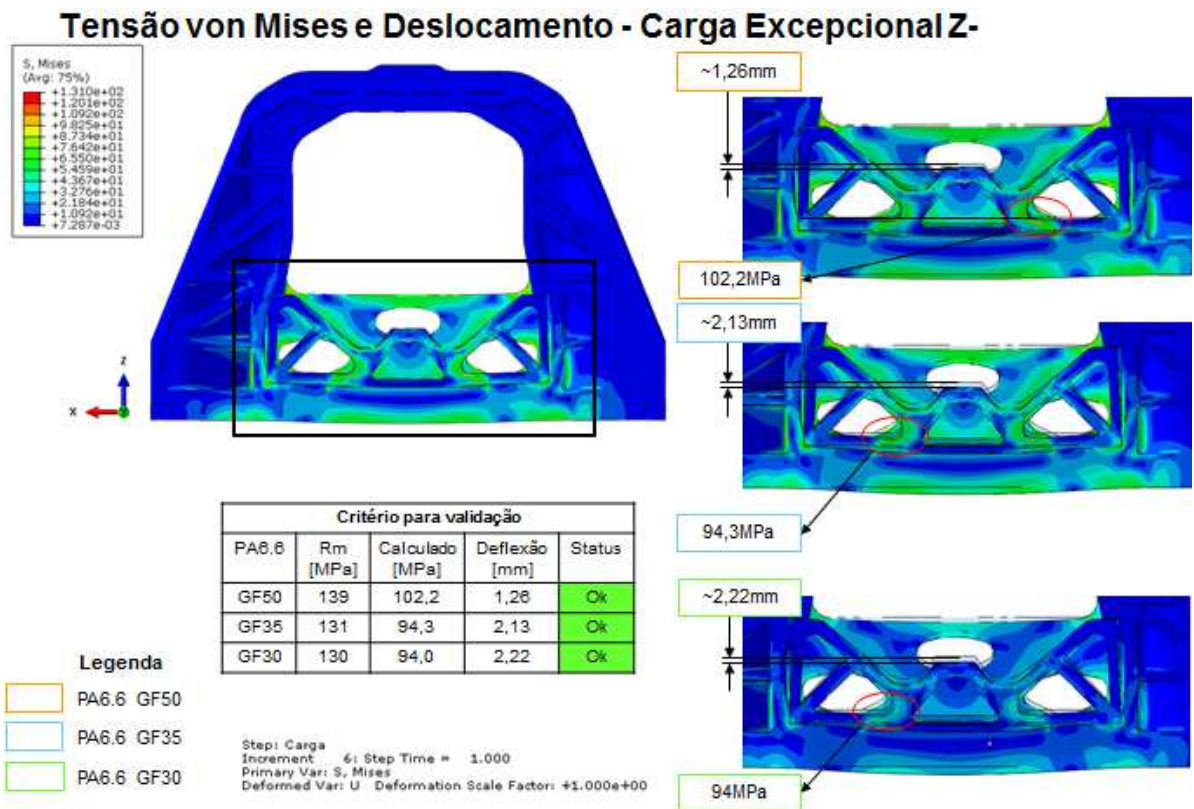


Figura 59: Análise por elementos finitos carcaça PA 6.6 (esforços excepcionais Z-).

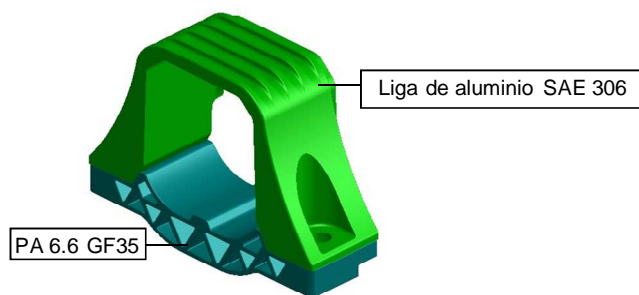
A análise por elementos finitos dos esforços excepcionais é considerada um dos mais críticos devido aos altos valores de carregamento aplicados sobre os componentes automotivos. Os resultados para o eixo de X foram positivos, apresentando valores de tensão de aproximadamente 1% menor em relação ao critério de aprovação, mostrando uma grande proximidade ao limite de tensão. Para o eixo Y os resultados foram positivos mostrando valores de tensão de aproximadamente 35% do limite de tensão. Para o eixo Z os resultados foram positivos com valores de tensão de aproximadamente 30% do valor limite de tensão.

Para aumentar o nosso campo de análise, foram utilizados os mesmos carregamentos aplicados na carcaça em compósito de poliamida para a carcaça em alumínio injetado, para dimensionar sua deformação-deslocamento e suas respectivas tensões.

Para a determinação do critério de validação da liga de alumínio SAE 306 foram utilizadas as especificações do material comercial para determinação do limite de ruptura, do limite elástico. Para determinação do limite de fadiga utilizamos o procedimento PSA AGCC\_ADTR08\_0638 que para liga de alumínio adota como critério de validação 50% do limite elástico.

A tabela 21 mostra as especificações utilizadas para a liga de alumínio SAE 306 e PA 6.6 GF35 para as análises por elementos finitos da carcaça metálica.

Tabela 21: Critério de validação para análise de elementos finitos para fadiga, esforços máximos e esforços excepcionais.



Critério de aprovação	Limite de Fadiga (MPa)	$R_e$ Esforços máximos (MPa)	$R_m$ Esforços excepcionais (MPa)
Aluminio SAE 306	70,00	140,00	240,00
PA 6.6 GF35	66,46	70,40	131,00

Os carregamentos foram aplicados utilizando o mesmo método e direções utilizadas para a carcaça em compósito de poliamida. A seguir as figuras 60 a 63 mostram os resultados do cálculo por elementos finitos aplicados sobre esforços de fadiga.

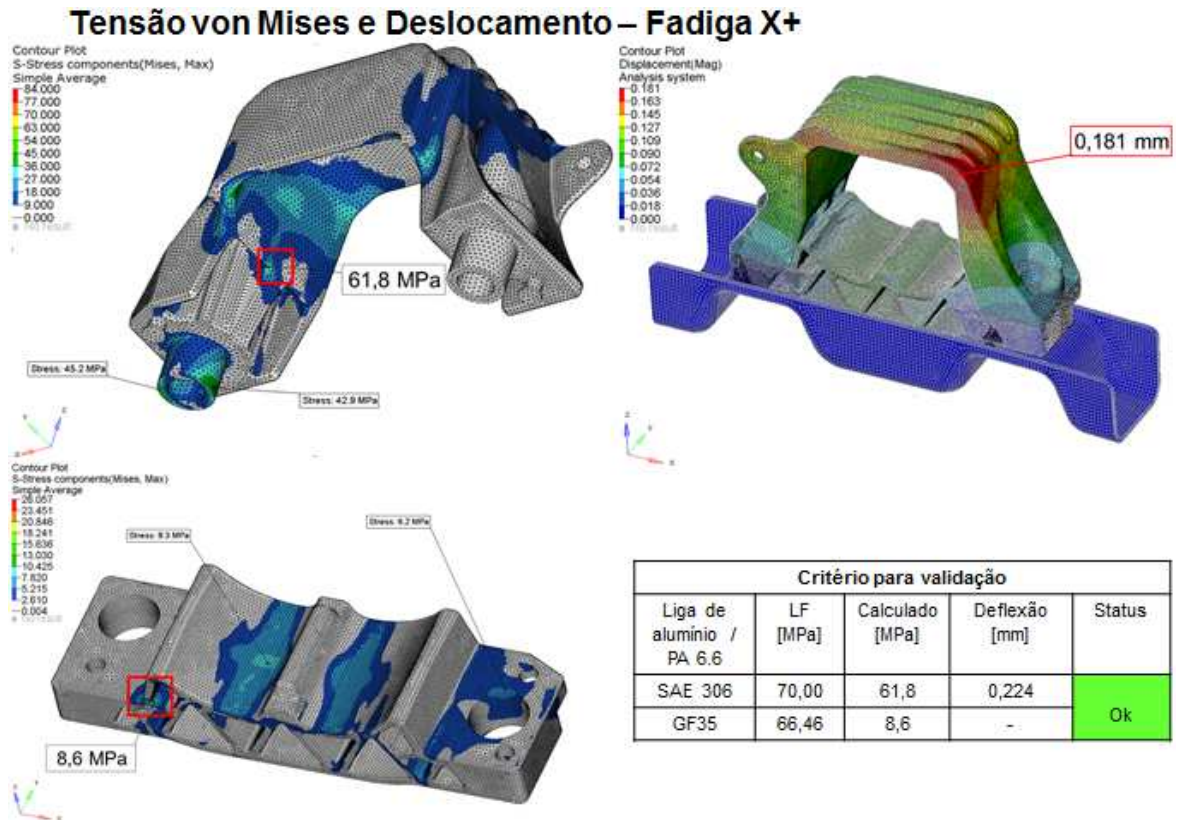


Figura 60: Análise por elementos finitos carcaça SAE 306 (fadiga X+).



### Tensão von Mises e Deslocamento – Fadiga X-

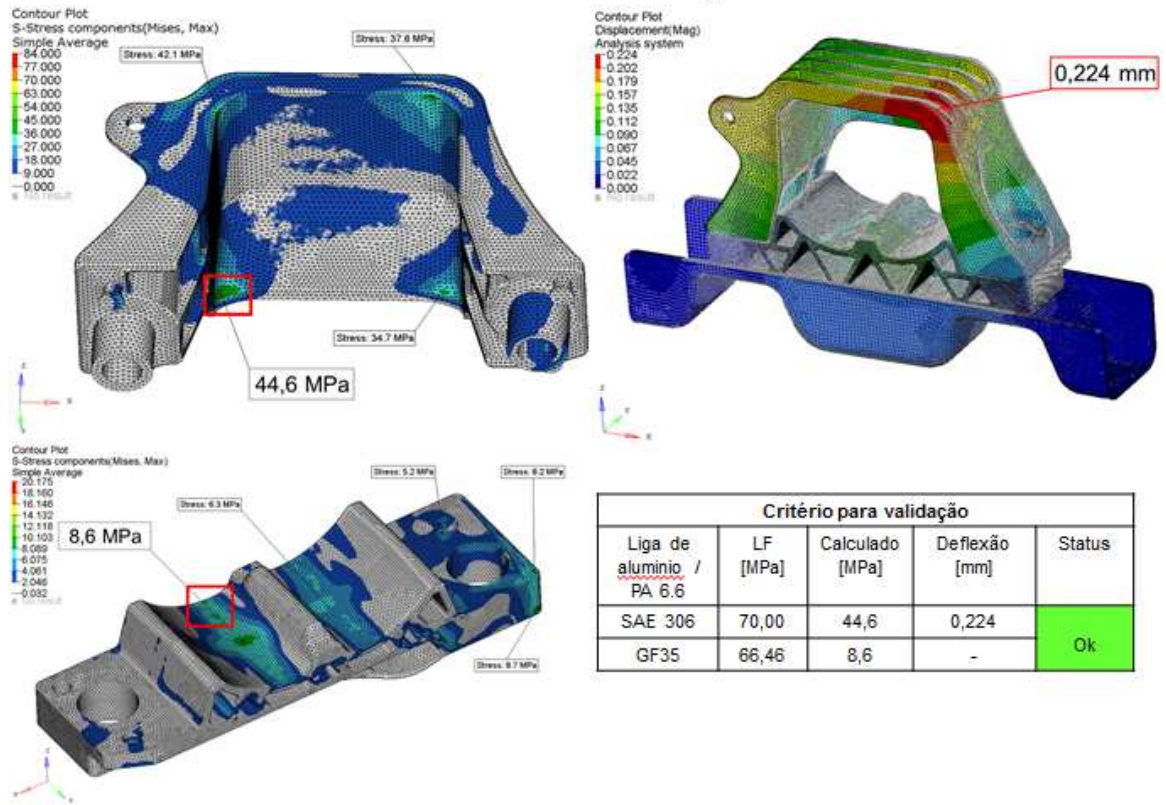


Figura 61: Análise por elementos finitos carcaça SAE 306 (fadiga X-).

### Tensão von Mises e Deslocamento – Fadiga Z+

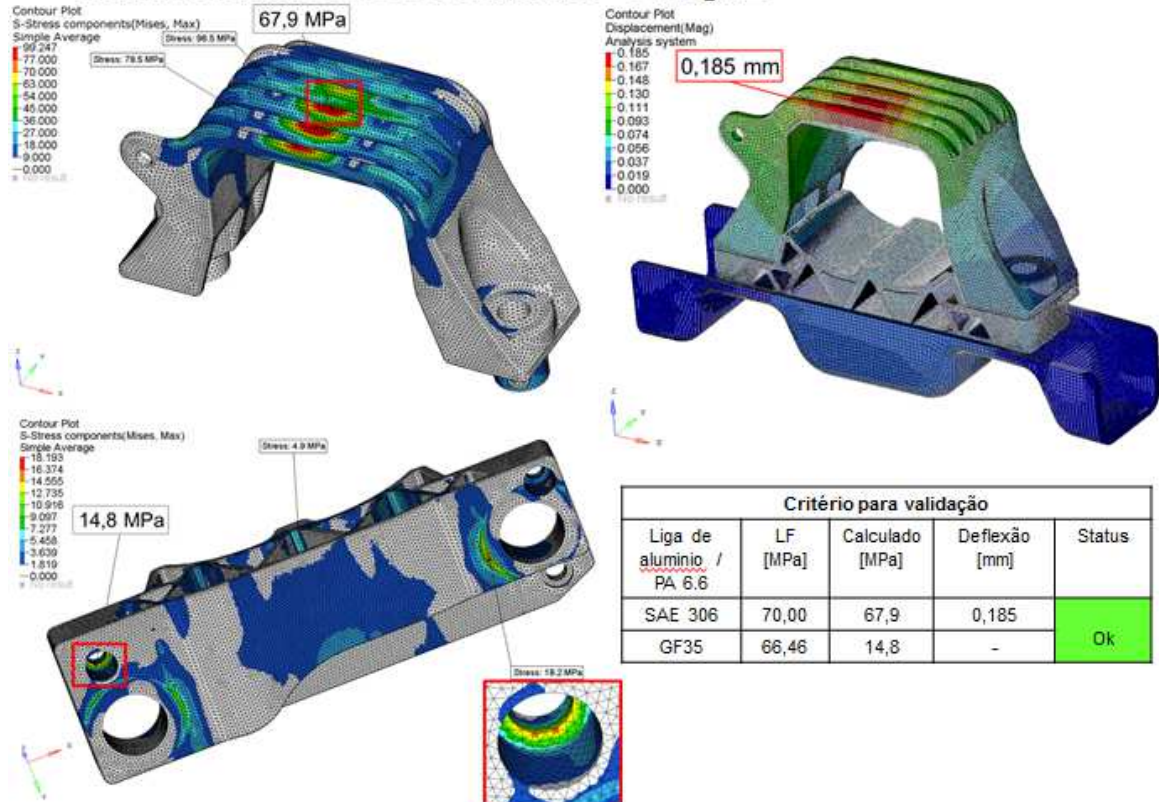


Figura 62: Análise por elementos finitos carcaça SAE 306 (fadiga Z+).

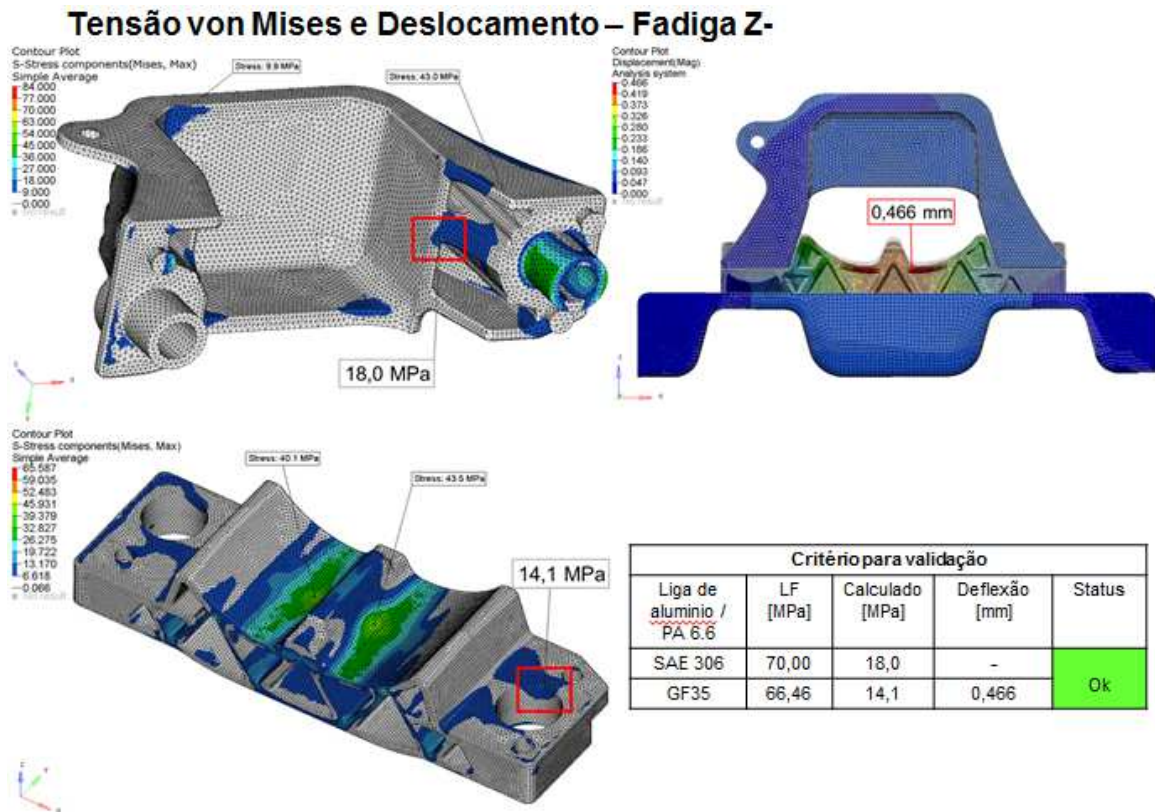


Figura 63: Análise por elementos finitos carcaça SAE 306 (fadiga Z-).

Comparando os resultados obtidos do suporte de injeção de alumínio sobre o suporte de compósito de poliamida é possível fazer algumas análises sobre os esforços de fadiga:

- Eixo X: O suporte de injeção de alumínio apresentou o resultado no nível de tensão mais próximo ao limite de aprovação comparado ao suporte de compósito de poliamida, no entanto sua deflexão apresenta valores três vezes menores que o suporte de compósito de poliamida.
- Eixo Z: O suporte de injeção de alumínio apresentou resultados similares para Z+ ficando próximo ao limite de aprovação para o critério de fadiga, no entanto em Z- os valores de tensões apresentados pela base em compósito de poliamida do suporte de injeção de alumínio são menores aproximadamente 60% correlacionado ao critério de aprovação. Avaliando a deflexão o suporte de compósito de poliamida apresenta maior deflexão em aproximadamente quatro vezes os valores apresentados pelo suporte em injeção de alumínio.

A seguir as figuras 64 a 68 mostram os resultados do cálculo por elementos finitos aplicados sobre esforços máximos.



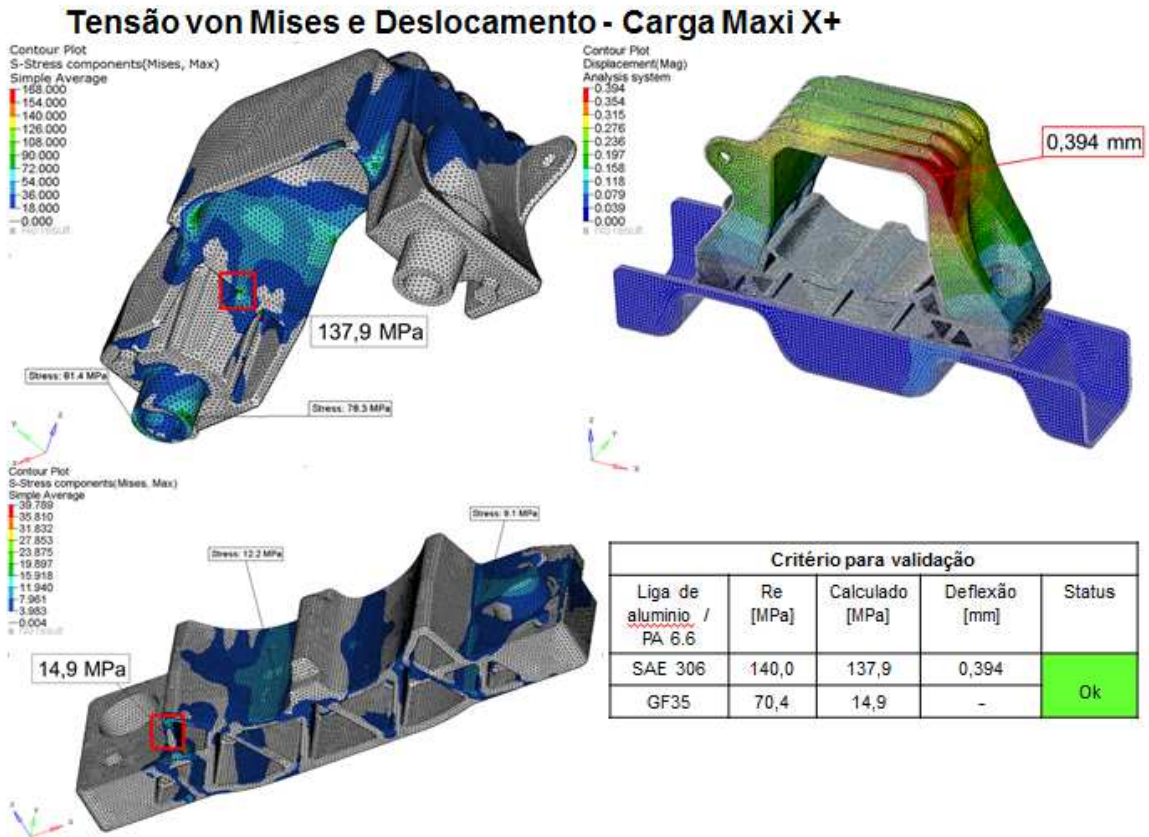


Figura 64: Análise por elementos finitos carcaça SAE 306 (esforços máximos X+).

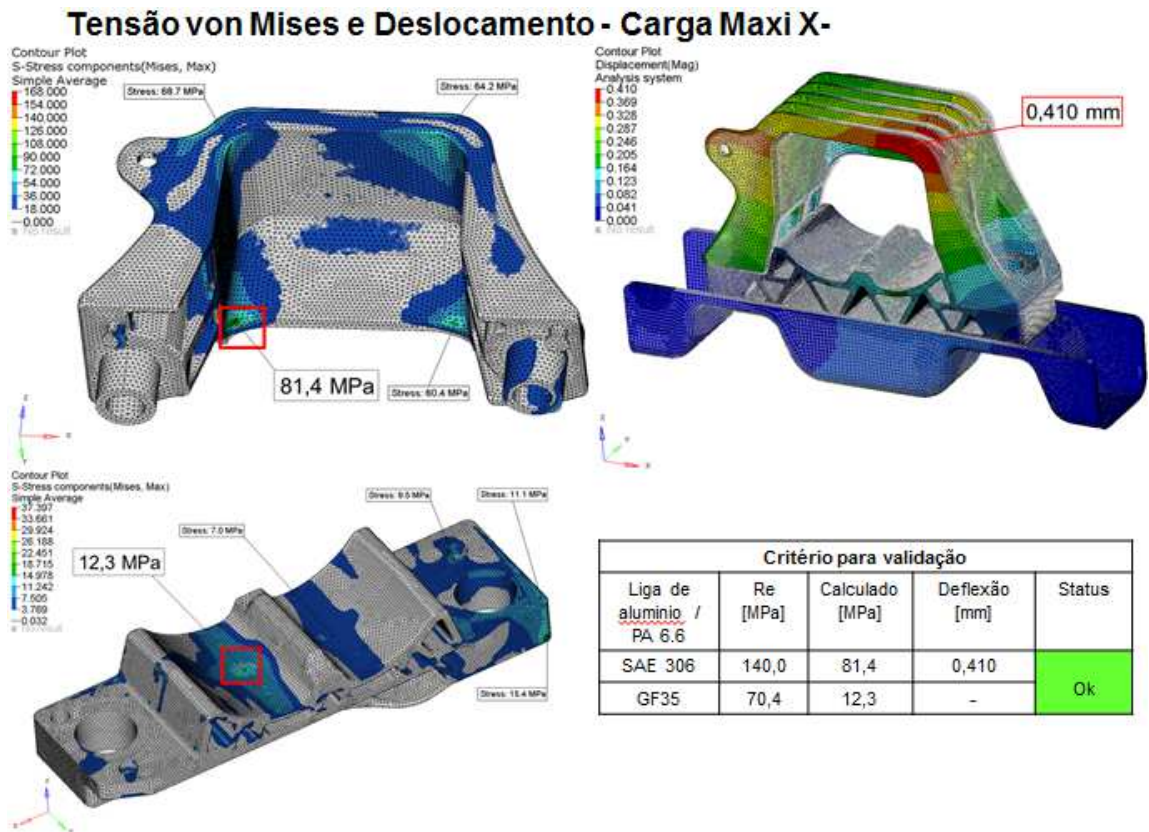


Figura 65: Análise por elementos finitos carcaça SAE 306 (esforços máximos X-).

### Tensão von Mises e Deslocamento - Carga Maxi Y+

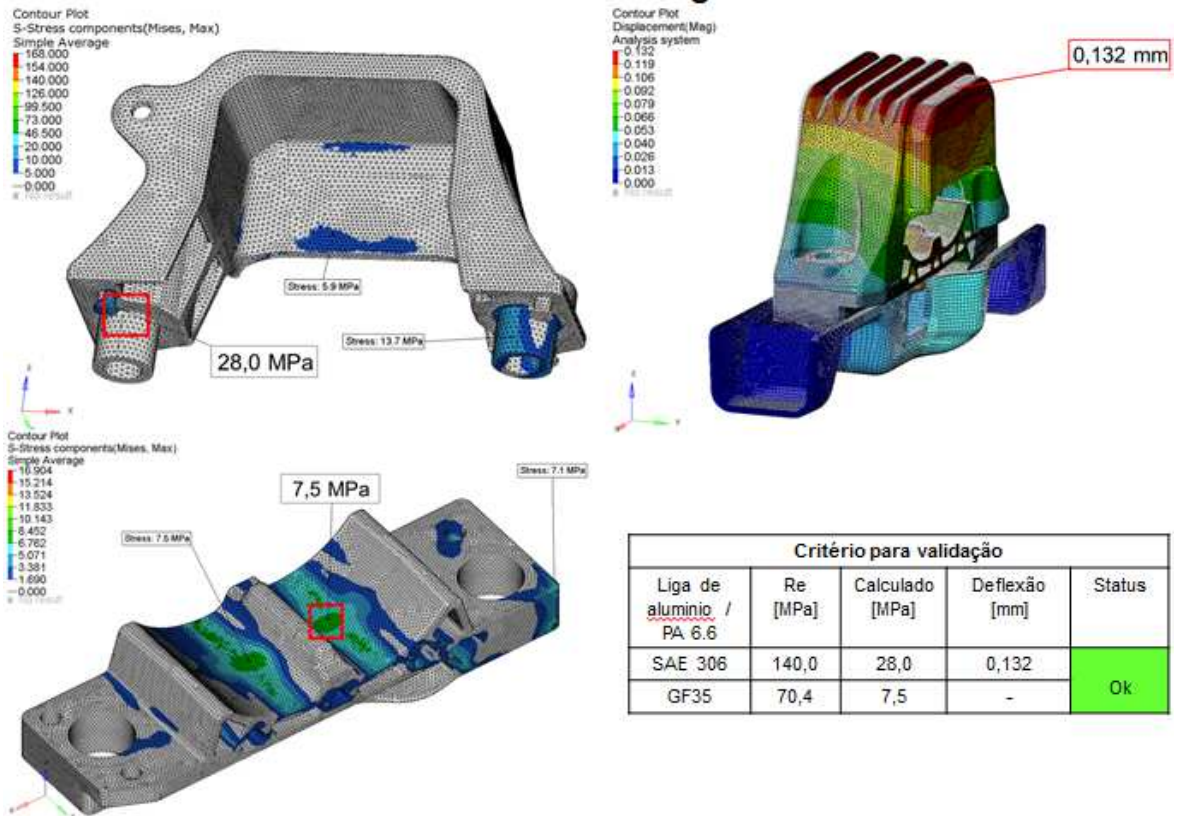


Figura 66: Análise por elementos finitos carcaça SAE 306 (esforços máximos Y+).

### Tensão von Mises e Deslocamento - Carga Maxi Z+

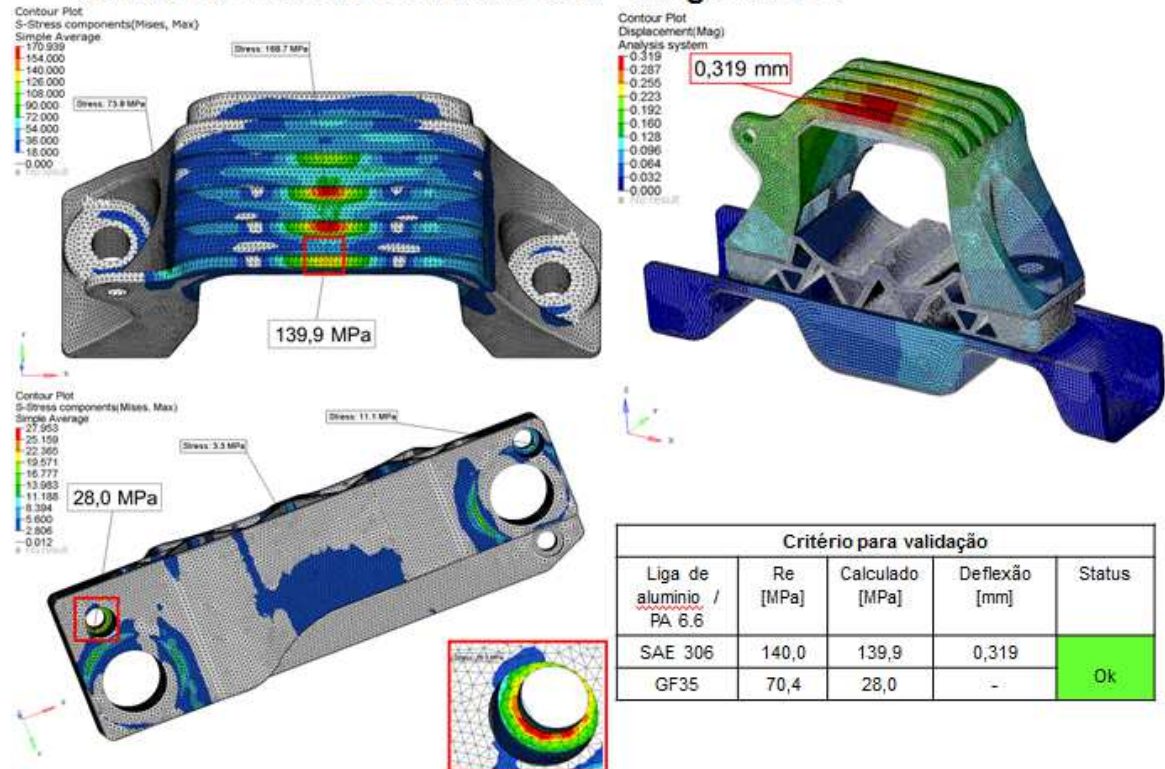


Figura 67: Análise por elementos finitos carcaça SAE 306 (esforços máximos Z+).



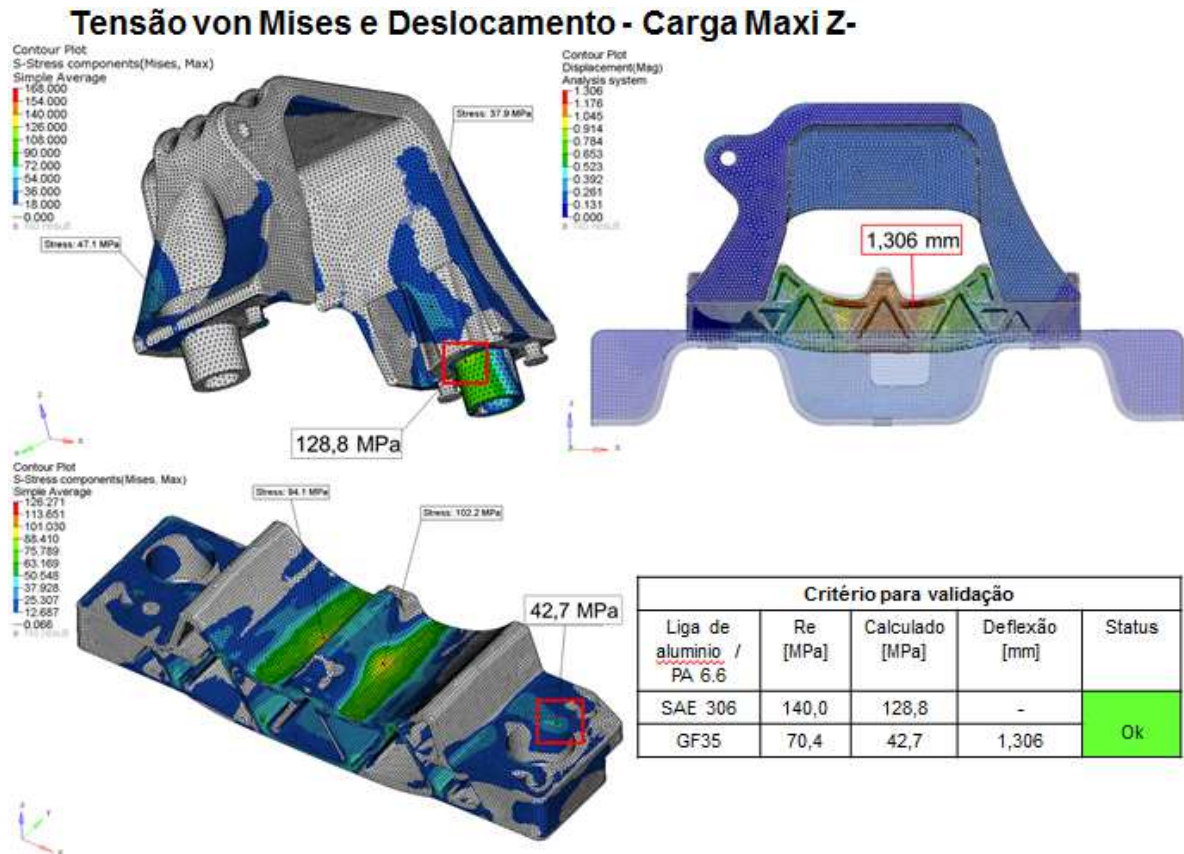


Figura 68: Análise por elementos finitos carcaça SAE 306 (esforços máximos Z-).

Comparando os resultados obtidos do suporte de injeção de alumínio sobre o suporte de compósito de poliamida é possível fazer algumas análises sobre os esforços máximos:

- Eixo X: O suporte de injeção de alumínio apresentou o resultado do nível de tensão mais próximo ao limite de aprovação comparado ao suporte de compósito de poliamida, no entanto sua deflexão apresenta valores aproximadamente duas vezes menores que o suporte de compósito de poliamida.
- Eixo Y: O suporte de injeção de alumínio mostrou grande superioridade, o resultado mostrou o nível de tensão de 80% menor em relação ao critério de aprovação. Os resultados de deflexão mostram valores menores do suporte de compósito de poliamida comparados ao suporte de injeção de alumínio em aproximadamente 1%.
- Eixo Z: O suporte de injeção de alumínio apresentou resultados similares para Z+ ficando próximo ao limite de aprovação para o critério de esforços máximos. Os resultados de deflexão do suporte de injeção de alumínio apresentaram resultados de deslocamento quatro vezes menores comparados ao suporte de compósito de poliamida.

A seguir as figuras 69 a 73 mostram os resultados do cálculo por elementos finitos aplicados sobre esforços excepcionais.

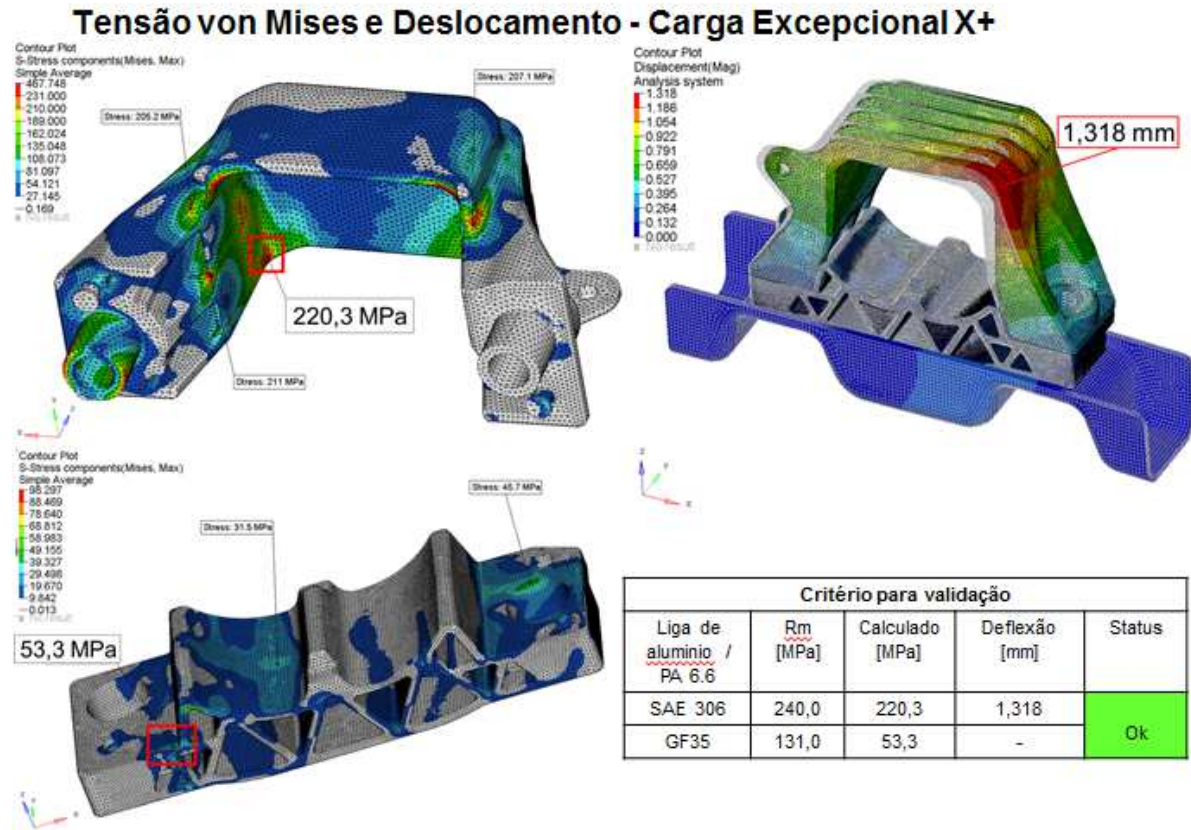


Figura 69: Análise por elementos finitos carcaça SAE 306 (esforços excepcionais X+).

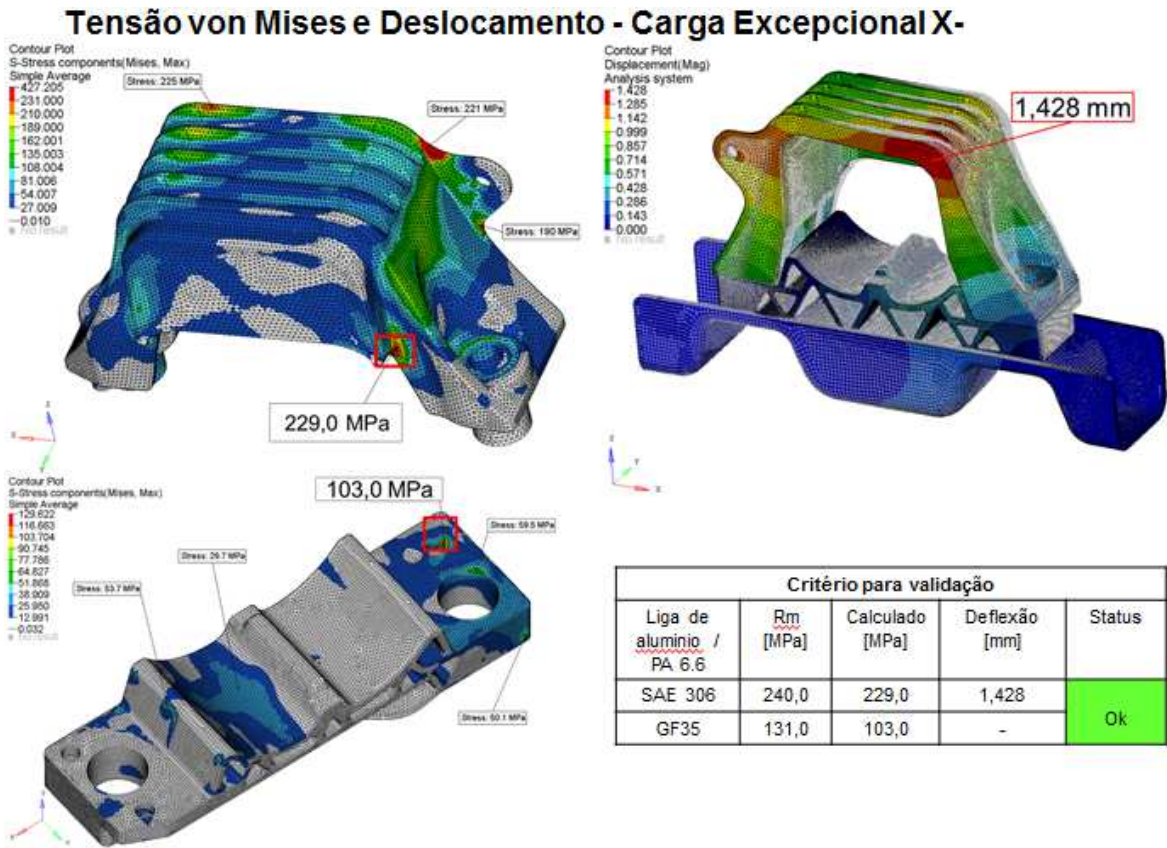


Figura 70: Análise por elementos finitos carcaça SAE 306 (esforços excepcionais X-).

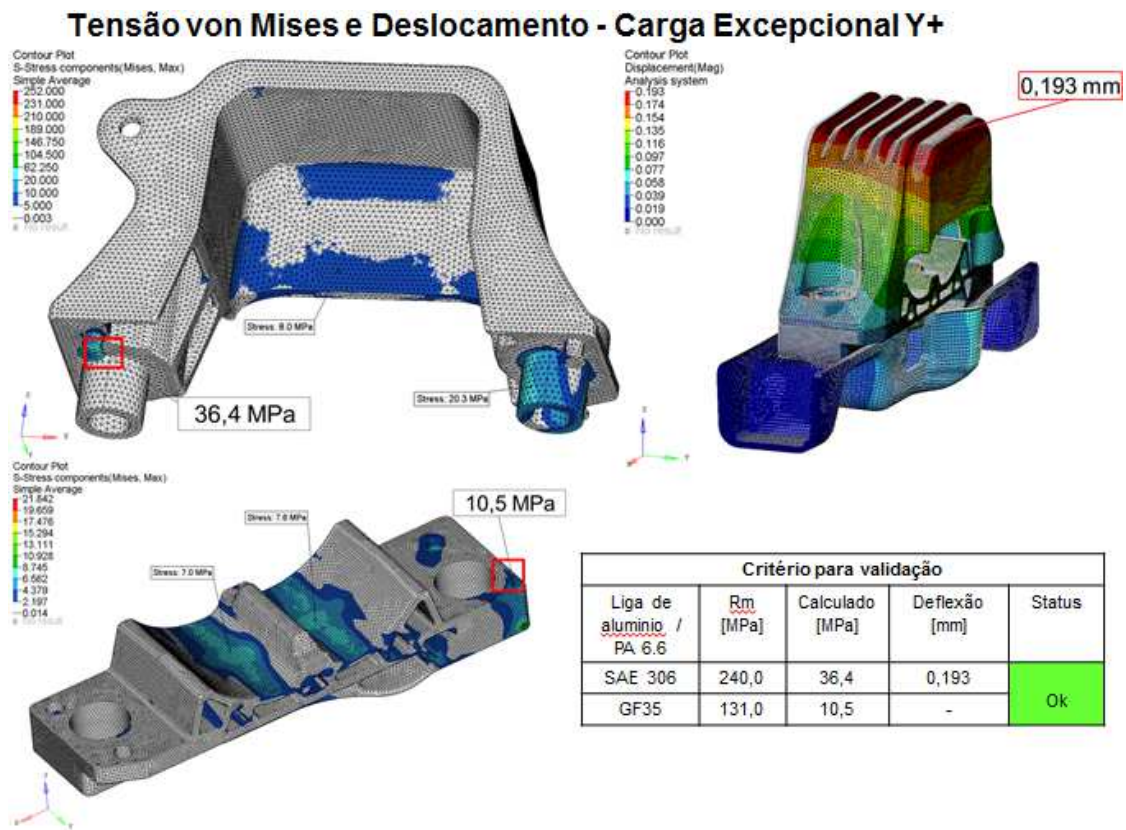


Figura 71: Análise por elementos finitos carcaça SAE 306 (esforços excepcionais Y+).



### Tensão von Mises e Deslocamento - Carga Excepcional Z+

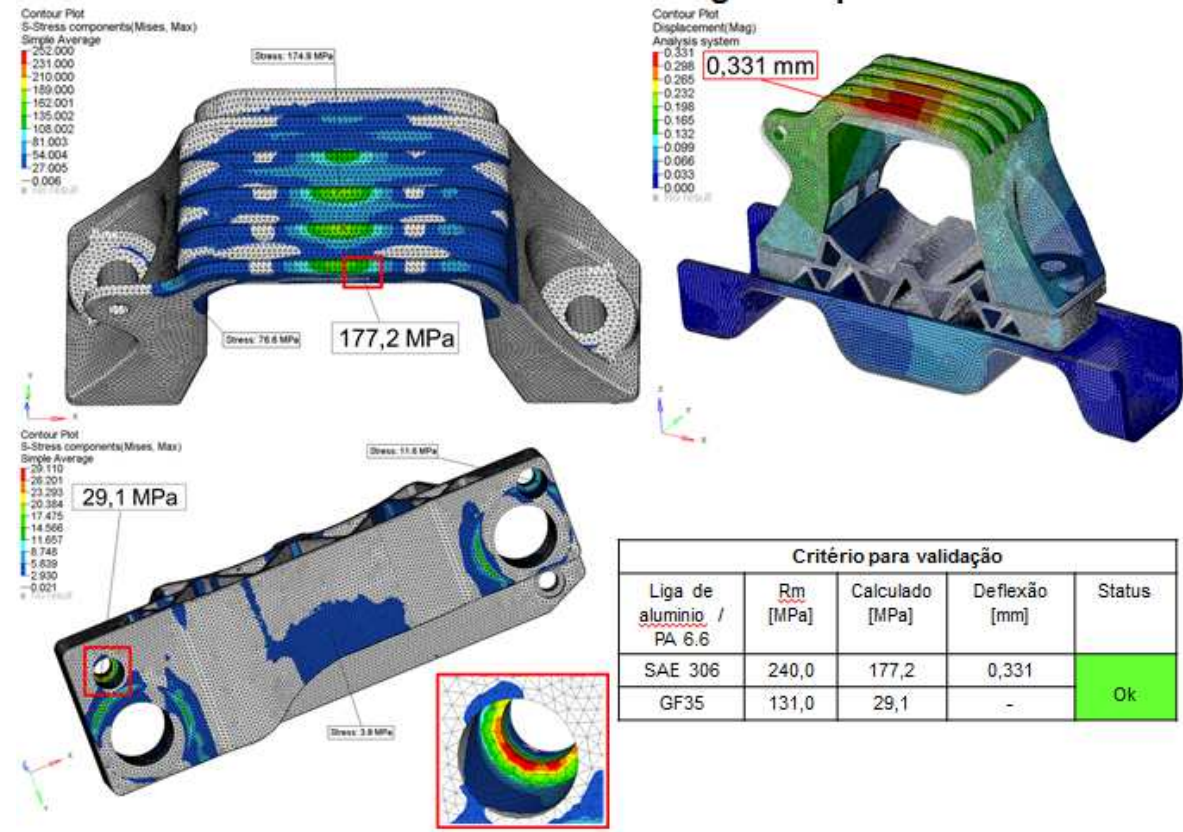


Figura 72: Análise por elementos finitos carcaça SAE 306 (esforços excepcionais Z+).

### Tensão von Mises e Deslocamento - Carga Excepcional Z-

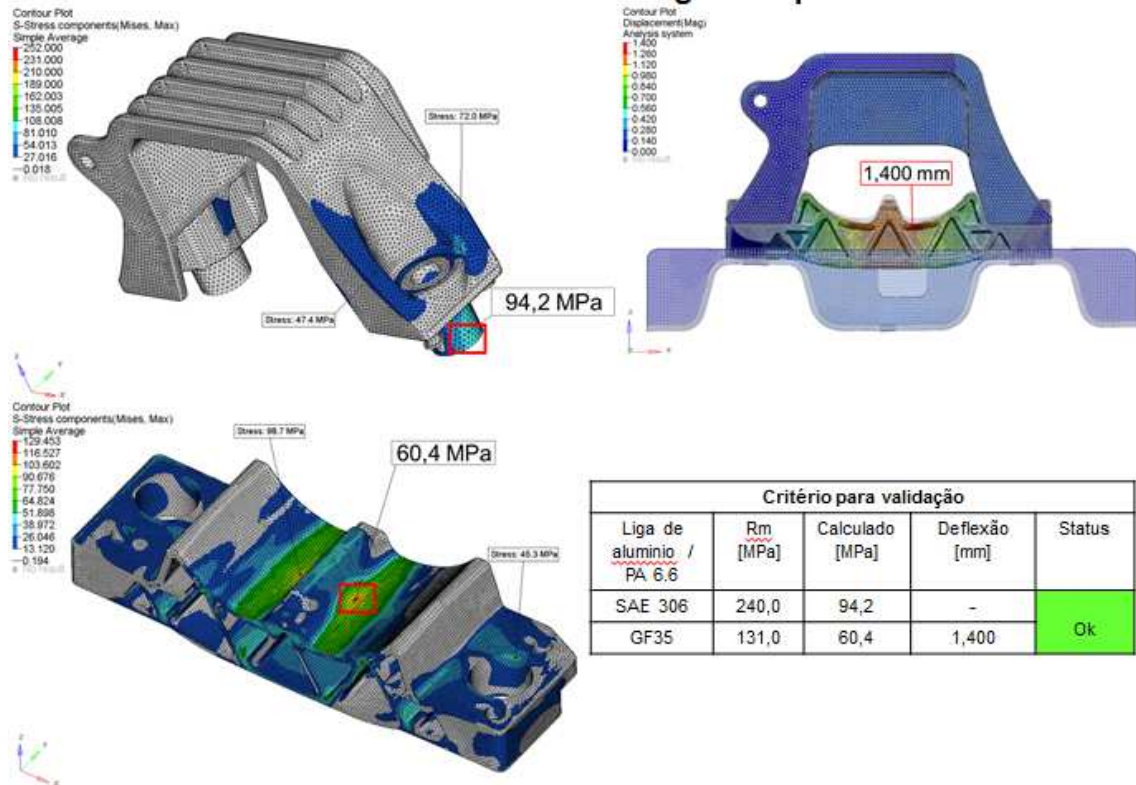


Figura 73: Análise por elementos finitos carcaça SAE 306 (esforços excepcionais Z-).

Comparando os resultados obtidos sobre o suporte de compósito de poliamida é possível fazer algumas análises sobre os esforços excepcionais:

- Eixo X: O suporte de injeção de alumínio apresentou resultados similares aos resultados do suporte de compósito de poliamida ficando próximo ao limite de tensão, no entanto sua deflexão apresenta valores de aproximadamente três vezes menores que o suporte de compósito de poliamida.
- Eixo Y: O suporte de injeção de alumínio mostrou grande superioridade, o resultado mostrou o nível de tensão de 80% menor em relação ao critério de aprovação. Os resultados da deflexão mostram que o suporte de compósito de poliamida apresentou uma deflexão menor que o suporte em injeção de alumínio em aproximadamente 1%. O motivo pode estar atribuído à geometria do suporte de compósito de poliamida, pois sua construção oferece uma maior rigidez para os esforços nesta direção.
- Eixo Z: O suporte de injeção de alumínio apresentou resultados similares comparados aos do suporte de compósito de poliamida para o eixo Z+ apresentando valores de tensão 25% menor em relação ao critério de aprovação, para o eixo Z- os resultados foram positivos apresentando valores de tensão de aproximadamente 55% menor em relação ao critério de aprovação. Os resultados de deflexão apresentam valores de aproximadamente duas vezes menores comparados, por exemplo, ao suporte de compósito de poliamida GF50.

Este comparativo tem o intuito de mostrar a capacidade do compósito de poliamida em suportar os mesmos esforços utilizados para validação do suporte em liga de alumínio, Não é possível compararmos seus limites de tensões para ambas as variáveis, em virtude dos materiais em questão pertencerem a famílias diferentes, consequentemente tendo propriedades diferentes.

Desta forma, foi possível chegar a uma geometria dimensionada para utilização do compósito de poliamida com fibra de vidro com uma redução de massa de 0,198 kg, representando 32% da massa do coxim motor com carcaça de liga de alumínio. A figura 74 mostra a distribuição de massa sobre a carcaça de compósito de poliamida.

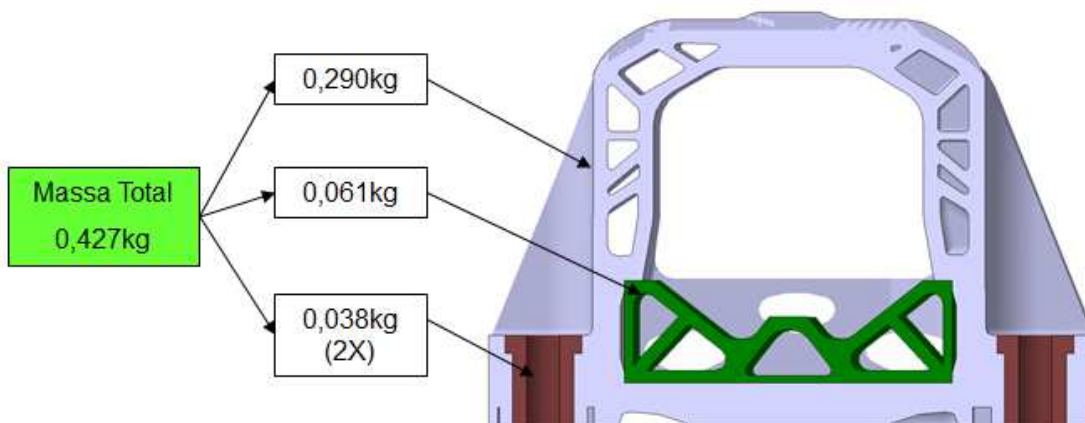


Figura 74: Demonstrativo da massa da carcaça do coxim motor de composto de poliamida.

Após as aprovações na análise por elementos finitos foi definida a geometria final, podendo ser submetida aos ensaios físicos contidos no caderno de encargos deste componente para que seja validado em caráter final. Estes ensaios estão compreendidos e validados dentro dos cálculos por elementos finitos que de forma preventiva e aferida obtivemos os resultados positivos. A seguir a figura 75 mostra a imagem da geometria final.

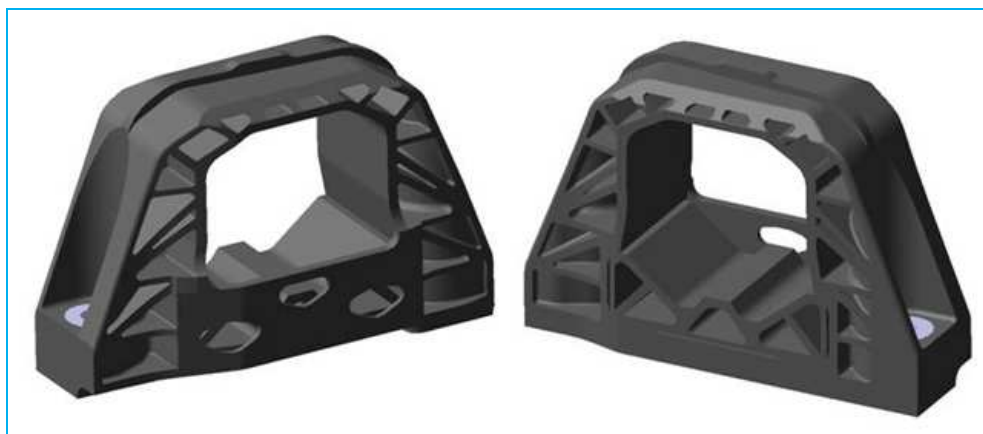


Figura 75: Geometria final – carcaça em composto de poliamida.

Importante salientar que esta pesquisa verificou um novo método de validação para a utilização de polímeros, afim de substituir materiais metálicos estruturais. O método apresentado pode ser utilizado para outros polímeros, com o intuito de possibilitar e flexibilizar a utilização de novos materiais.



## 5 CONCLUSÕES

O método criado nesta pesquisa para caracterização do corpo de prova virtual utilizou a base experimental para aferir as propriedades dos materiais, e fazer com que a análise por elementos finitos permita determinar as reais propriedades dos materiais na análise virtual.

O ensaio de ruptura em flexão permitiu definir toda a base de dados necessários para definição o ensaio de fadiga, e por consequência, através da curva de carregamento-deflexão permitiu também obter os novos limites de ruptura ( $R_m$ ) e limites de elasticidade ( $R_e$ ) para os respectivos compósitos.

O método Staircase adotado nesta pesquisa para analisar o comportamento em fadiga da poliamida e dos compósitos de poliamida foi eficaz, e os resultados permitiram definir o limite de fadiga não encontrados em trabalhos anteriores, permitindo também definir o critério de validação sobre a análise por elementos finitos.

O ensaio de fadiga pelo método Staircase permitiu analisar o comportamento da poliamida e de cada compósito de poliamida quanto à quantidade de amostras, as deflexões obtidas e principalmente certificar que a inclusão da fibra de vidro na poliamida é imperativa para substituir a liga de alumínio, pois os resultados mostram que o aumento da quantidade de fibra dos compósitos aproximam suas propriedades às dos metais.

Nos ensaios foi aplicada a temperatura de  $120^\circ\text{C}$ , aproximando o ensaio da condição térmica transmitida para os coxins pelo motor de um veículo em trabalho, e os resultados positivos comprovam a boa resistência dos compósitos estudados sobre aplicação de esforços cíclicos sob temperatura.

Por meio dos resultados obtidos nos ensaios de fadiga, esforços máximos e esforços excepcionais deve-se destacar o compósito PA 6.6 GF50 que permitiu menor deflexão e, conseqüentemente, menor deslocamento em operação comparado aos compósitos PA 6.6 GF30 e PA 6.6 GF35. Para a poliamida 6.6 sem fibra de vidro, pode-se afirmar que a ausência da fibra de vidro em sua formulação mostra que os resultados não são dimensionáveis de acordo com a norma PSA B32 0730 e por não terem propriedades mecânicas em fadiga comparáveis aos metais, se torna uma opção dispensável para o estudo voltado a substituição da liga de alumínio.

A análise por microscopia eletrônica de varredura das superfícies de fratura dos compósitos evidenciou a excelente aderência da poliamida na fibra de vidro. Outro aspecto observado foi a presença de regiões mais planas nas superfícies de fratura da poliamida nas

zonas tracionadas dos corpos de prova ensaiados em fadiga. A injeção dos corpos de prova foi realizada sem o alinhamento das fibras na direção de aplicação do carregamento os corpos de prova. Esta condição indica que as propriedades em fadiga poderiam ser maiores, caso as fibras de vidro estivessem alinhadas.

De acordo com a expectativa desta pesquisa obtivemos a redução de massa de 0,198 kg (32%) que terá grande contribuição ao objetivo total de diminuição de massa para melhoria de desempenho dos automóveis. Com os resultados desta pesquisa acredita-se que outros componentes automotivos poderão ser estudados para que os materiais metálicos sejam substituídos pelos polímeros buscando o mesmo ou um comportamento similar à existente.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM D-790: Standard Test Methods for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials, 2000.
- BERTHEREAU, A.; DALLIES, E. Fibres de verre de renforcement. Editions Weka, France, AM5132, p. 1-19, jan. 2008.
- CALLISTER Jr., W. D. Ciência e engenharia de materiais: uma introdução. LTC. Rio de Janeiro, 2008.
- CANEVAROLO Jr., S. V. Ciência dos Polímeros – Um Texto Básico para Tecnólogos e Engenheiros. Artliber Editora. São Paulo, 2002.
- CHAUVET, L. Trelleborg Weight Reduction Strategy - Utilization of Plastic for Structural Components for Power Train Mounting System, SAE Technical Paper 2012-28-0017, 2012, doi:10.4271/2012-28-0017.
- CHATAIN, M. Comportements physique et thermomécanique des plastiques. Editions Weka, France, A3110, p. 1-57, mai. 1993.
- COURTEILLE, E.; MORTIER, F.; LEOTOING, L.; RAGNEAU, E. Optimisation d'un système de suspension moteur pour une amélioration du confort vibro-acoustique. In: CONGRÈS FRANÇAIS DE MÉCANIQUE, 16, 2003, France.
- DAMIANI, R. A. Estudo do efeito de parâmetros de processamento por injeção nas propriedades mecânicas do nanocompósito de poliamida/fibra de vidro/montmorilonita. Dissertação (mestrado) – Universidade do Extremo Sul Catarinense, Criciúma. 2013.
- DUPONT ENGINEERING POLYMERS. Design Guide - Module II. H-58636. United States. 2005. 121 p.
- FACTORI, I. M. Processamento e propriedades de compósitos de poliamida 6.6 reforçada com partículas de vidro reciclado. Dissertação (mestrado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo. 2009.
- FARIA, C. M. C.; BOTELHO, E. C.; CIOFFI, M. O. Avaliação da resistência à fadiga do compósito de fibras de vidro/PPS. In: 9º CONGRESSO BRASILEIRO DE POLÍMEROS, 2007, Anais... Campina Grande: 2007.
- FREIRE Jr., R. C. S. Estudo da prevenção de falha por fadiga em laminados de plástico reforçado com fibra de vidro. Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte. 2001.
- GERE, J. M. Mecânica dos materiais. Editora Pioneira Thomson Learning. São Paulo, 2003.
- GUÉRIN, B. Polyamides. Editions Weka, France, A3360, p. 1-24, mai. 1994.

JONES, R. M.; Mechanics of composite materials. IBM Generalized Markup Language. Virginia. 1998.

JORDAN, J.; JACOB, K.; TANNENBAUM, R.; SHARAF, A. M.; JASIUK, I.: Experimental trends in polymer nanocomposites – a review. Materials Science and Engineering, A 393, 2005.

KRAWCZAK, P. Essais mécaniques des plastiques. Editions Weka, France, AM3512, p. 1-31, jan. 2000.

LOPES, K. S. Influência dos parâmetros de usinagem na resistência à fadiga de aços AISI 4140. Dissertação (Mestrado) – Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Belo Horizonte. 2006.

LUCAS, P. ; ZANELLA, G. Mise en oeuvre des composites TP. Compounds à fibres courtes et longues. Editions Weka, France, AM5235, p. 1-8, jan. 2007.

MOLLARD, G. Polyamide 6-6. Editions Weka, France, J6515, p. 1-7, jun. 1997.

OLIVEIRA, G. H.; BOTELHO, E. C. Avaliação da resistência à fadiga do compósito de fibras de carbono/PEI com aplicações na indústria aeroespacial. In: IX CONGRESSO DOS ESTUDANTES DE CIÊNCIAS DE MATERIAIS DO MERCOSUL, 2007, Anais... Santa Catarina: 2007.

OLIVEIRA, P.A.C.A. Modelagem da dinâmica vertical de coxins elastoméricos de motor através de método de redes neurais. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, São Paulo. 2011.

OLIVEIRA, G. H.; BOTELHO, E. C. Avaliação da resistência à fadiga do compósito de fibras de carbono/PEI com aplicações na indústria aeroespacial. In: IX CONGRESSO DOS ESTUDANTES DE CIÊNCIAS DE MATERIAIS DO MERCOSUL, 2007, Anais... Santa Catarina: 2007.

PIVATO, P. R. N.; ABDALA, A.J.; BAPTISTA, C. A. R. P.; HASHIMOTO, T.M.; PEREIRA, M.S.; ANAZAWA, R.M. Estudo comparativo do comportamento mecânico em tração e fadiga de aços com microestruturas multifásicas, In: 17º CBECIMAT – CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA E CIÊNCIA DOS MATERIAIS, 2006, Anais... Foz do Iguaçu: 2006.

PSA PEUGEOT CITROEN. B32 0730: Adaptation GMP Procédure d’essai de Validation en Fatigue des Pièces Métalliques, 2005.

PSA PEUGEOT CITROEN. AGCC ADTR08 0638: Préconisations PSA pour le Calcul de Tenue Mécanique d’un Support Moteur, 2008.

RHODIA POLIAMIDAS E ESPECIALIDADES. Ficha técnica Technyl A 118 V50. A FT 005. V2. São Paulo. Set. 1998.

RHODIA POLIAMIDAS E ESPECIALIDADES. Ficha técnica Technyl A 218 V35. A FT 045. V2. São Paulo. Dez. 2002.

RHODIA POLIAMIDAS E ESPECIALIDADES. Ficha técnica Technyl A 218 V30. A FT 036. V4. São Paulo. Out. 2010.

RHODIA POLYAMIDE ENGINEERING PLASTICS. Technyl A 216. Saint-Fons. France. Mar. 2009.

SANTOS, A. M. Estudo de compósitos híbridos polipropileno/fibras de vidro e coco para aplicações em engenharia. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Paraná, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Curitiba. 2006.

SILVA, L.C.; TURRA, G.; SANTOS, W.F. Substituição do material do suporte do coxim motor – Metal para Poliamida. SAE Brasil, São Paulo, 2012-36-0144, p. 1-6, 2012.

WIEBECK, H. ; HARADA, J. ; SANTOS, P. A.; OLIVEIRA, K. S.; Plásticos de Engenharia Tecnologia e Aplicações. Artliber Editora. São Paulo, 2005.

YUNHE Y.; NAGANATHAN N. G.; DUKKIPATI R. V; Literature review of automotive vehicle engine mounting systems. Mechanism and Machine Theory, v.36, n.1, jan. 2001.