



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA MECÂNICA

**“ANÁLISE DA VIABILIDADE MECÂNICA DA REDUÇÃO DE PESO DO
COMPARTIMENTO DE CARGA DE UMA PICK-UP PELA SUBSTITUIÇÃO
DE PAINÉIS METÁLICOS POR POLÍMEROS REFORÇADOS”**

IGOR POMPEU DOS ANJOS

Belo Horizonte, 30 de junho de 2018

Igor Pompeu dos Anjos

**“ANÁLISE DA VIABILIDADE MECÂNICA DA REDUÇÃO DE PESO DO
COMPARTIMENTO DE CARGA DE UMA PICK-UP PELA SUBSTITUIÇÃO
DE PAINÉIS METÁLICOS POR POLÍMEROS REFORÇADOS”**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Minas
Gerais, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre
em Engenharia Mecânica.

Área de concentração: Projetos e Sistemas

Orientador: Prof. Antônio Ferreira Ávila, Ph. D.

Universidade Federal de Minas Gerais

Belo Horizonte

Escola de Engenharia da UFMG

2018

A599a

Anjos, Igor Pompeu dos.

Análise da viabilidade mecânica da redução de peso do compartimento de carga de uma pick-up pela substituição de painéis metálicos por polímeros reforçados [manuscrito] / Igor Pompeu dos Anjos. – 2018. 105 f., enc.: il.

Orientador: Antônio Ferreira Ávila.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia.

Bibliografia: f. 99 - 105.

1. Engenharia mecânica - Teses. 2. Fibras de vidro - Teses. 3. Desempenho - Teses. 4. Materiais compostos - Teses. I. Ávila, Antônio Ferreira. II. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia. III. Título.

CDU: 621(043)



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA MECÂNICA

Av. Antônio Carlos, 6627 - Campus Universitário
31270-901 - Belo Horizonte - MG
Tel.: +55 31 3409.5145
E-mail: cpgmec@demec.ufmg.br

**"ANÁLISE DA VIABILIDADE MECÂNICA DA REDUÇÃO DE PESO
DO COMPARTIMENTO DE CARGA DE UMA PICK-UP PELA
SUBSTITUIÇÃO DE PAINÉIS METÁLICOS POR POLÍMEROS
REFORÇADOS"**

IGOR POMPEU DOS ANJOS

Dissertação submetida à Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Minas Gerais, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de "**Mestre em Engenharia Mecânica**", na área de concentração de "**PROJETO E SISTEMAS**".

Dissertação aprovada no dia 04 de setembro de 2018.

Por:

Prof. Antonio Ferreira Ávila
Orientador - Departamento de Engenharia Mecânica/ UFMG

Prof. Marcelo Greco
Departamento de Engenharia de Estruturas/ UFMG

Prof. Prof. José Eduardo Mautone Barros
Departamento de Engenharia Mecânica/ UFMG

AGRADECIMENTOS

À minha mãe e ao meu irmão pelo apoio e pelos exemplos.

À Renata Cristiane Arruda, pela paciência, compreensão e carinho.

À engenheira Luísa Vitorino, pelo auxílio e pela confiança.

Ao professor Antônio Ferreira Ávila, pela orientação e pela grande oportunidade.

Ao pessoal do cálculo virtual, pela humildade e pelo conhecimento transmitido.

À FCA, pela iniciativa.

A todos os meus amigos e familiares, que contribuíram de alguma maneira nessa etapa da minha vida.

SUMÁRIO

| | |
|---|----|
| AGRADECIMENTOS | 3 |
| LISTA DE FIGURAS | 7 |
| LISTA DE TABELAS | 9 |
| LISTA DE ABREVIACÕES E SIGLAS | 10 |
| RESUMO | 11 |
| 1 INTRODUÇÃO | 12 |
| 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA..... | 14 |
| 2.1 Cenário do setor automotivo | 14 |
| 2.2 Polímeros..... | 17 |
| 2.3 Categorias químicas de polímeros..... | 18 |
| 2.3.1 Polímeros termoplásticos | 18 |
| 2.3.2 Polímeros Termofixos | 18 |
| 2.4 Propriedades mecânicas e físicas dos polímeros..... | 19 |
| 2.4.1 Fratura de polímeros..... | 19 |
| 2.4.2 Resistência ao impacto | 19 |
| 2.4.3 Fadiga..... | 20 |
| 2.4.4 Deformação Elástica | 20 |
| 2.4.5..... | 21 |
| 2.4.6 Deformação Plástica..... | 21 |
| 2.4.7 Cristalização | 21 |
| 2.4.8 Temperatura de Fusão | 22 |
| 2.4.9 Temperatura de transição vítrea | 22 |
| 2.5 Fatores que influenciam as propriedades dos polímeros | 22 |
| 2.5.1 Peso molecular | 22 |
| 2.5.2 Grau de cristalinidade..... | 23 |
| 2.5.3 Predeformação por Drawing | 23 |
| 2.5.4 Recozimento..... | 23 |
| 2.6 Tipos de polímeros..... | 23 |
| 2.6.1 Plásticos..... | 23 |
| 2.6.2 Elastômero..... | 23 |
| 2.6.3 Fibras..... | 24 |
| 2.6.4 Revestimentos | 24 |
| 2.6.5 Adesivos | 24 |
| 2.6.6 Filmes..... | 24 |

| | | |
|---------|---|----|
| 2.6.7 | Espumas | 24 |
| 2.7 | processamento de polímeros | 25 |
| 2.7.1 | Moldagem por compressão | 25 |
| 2.7.2 | Extrusão..... | 25 |
| 2.7.3 | Moldagem por injeção..... | 26 |
| 2.7.4 | Moldagem por sopro | 28 |
| 2.7.5 | Moldagem por rotação | 28 |
| 2.7.6 | Termoformagem..... | 29 |
| 2.7.7 | Calandragem..... | 30 |
| 2.8 | Substâncias poliméricas mais utilizadas..... | 30 |
| 2.8.1 | Polietileno..... | 30 |
| 2.8.2 | Polipropileno | 32 |
| 2.8.3 | Policarbonatos | 33 |
| 2.8.4 | Poliestireno..... | 33 |
| 2.8.5 | Cloreto de Poli-vinil | 35 |
| 2.8.6 | Nylon..... | 35 |
| 2.8.7 | Poliéster..... | 36 |
| 2.8.8 | Poliuretano | 36 |
| 2.9 | Materiais Compósitos..... | 37 |
| 2.10 | Fibras mais utilizadas em compostos poliméricos | 38 |
| 2.10.1 | Fibra de vidro | 38 |
| 2.10.2 | Fibra de carbono..... | 39 |
| 2.10.3 | Aramida..... | 39 |
| 2.10.4 | Fibras de Basalto | 40 |
| 2.10.5 | Fibras de Boro | 40 |
| 2.10.6 | Fibras Naturais | 40 |
| 2.11 | processamento de compósitos poliméricos | 40 |
| 2.11.1 | Laminação manual | 40 |
| 2.11.2 | Laminação a Spray | 41 |
| 2.11.3 | Laminação a Vácuo..... | 41 |
| 2.11.4 | Moldagem por injeção reativa (RIM)..... | 42 |
| 2.11.5 | Moldagem por transferência de resina (RTM) | 42 |
| 2.11.6 | Moldagem por infusão de resina | 43 |
| 2.11.7 | Molde por compressão | 43 |
| 2.11.8 | Autoclave | 44 |
| 2.11.9 | Moldagem por injeção..... | 44 |
| 2.11.10 | Long Fiber Injection (LFI) | 45 |
| 2.11.11 | Direct Long-Fiber Thermoplastics (D-LFT) | 46 |
| 2.11.12 | Extrusão..... | 46 |

| | | |
|--------|---|----|
| 2.12 | Cálculo das propriedades de compósitos..... | 46 |
| 2.13 | Polímeros e compósitos poliméricos no setor automotivo | 59 |
| 2.13.1 | Interior do veículo | 59 |
| 2.13.2 | Painéis verticais e horizontais | 61 |
| 2.13.3 | Exterior do veículo | 61 |
| 2.13.4 | Grupo moto-propulsor..... | 62 |
| 2.13.5 | Sistema de combustível..... | 62 |
| 2.13.6 | Sistema de Iluminação e rodas | 63 |
| 2.14 | engenharia de carroceria..... | 63 |
| 2.15 | Desempenho veicular: rigidez à Torção e à flexão | 64 |
| 2.16 | Fundamentos de transmissão de calor | 66 |
| 3 | METODOLOGIA | 69 |
| 3.1 | Benchmarking | 69 |
| 3.2 | Análise de Materiais..... | 69 |
| 3.3 | Design de novas partes..... | 69 |
| 3.4 | Análise da performance do veículo, em termos de rigidez e distribuição de tensões . | 70 |
| 3.4.1 | Análise de rigidez torcional..... | 70 |
| 3.4.2 | Análise de rigidez flexional..... | 71 |
| 3.4.3 | Análise Modal | 72 |
| 3.4.4 | Análise de Rigidez Localizada | 72 |
| 4 | DESENVOLVIMENTO | 73 |
| 4.1 | Avaliação em temperatura ambiente | 79 |
| 4.2 | Avaliação em alta temperatura | 88 |
| 5 | CONCLUSÃO | 98 |
| 6 | REFERÊNCIAS | 99 |

LISTA DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1: estrutura geral do polietileno | 31 |
| Figura 2: Estrutura básica do Polipropileno | 32 |
| Figura 3: estrutura básica do policarbonato | 33 |
| Figura 4: estrutura geral do poliestireno | 34 |
| Figura 5: Estrutura básica do cloreto de polivinil | 35 |
| Figura 6: estrutura geral do Nylon | 35 |
| Figura 7: estrutura básica do poliéster..... | 36 |
| Figura 8: estrutura geral do poliuretano | 37 |
| Figura 9: Componentes de tensões..... | 47 |
| Figura 10: esquema de um laminado ortotrópico..... | 48 |
| Figura 11: rotação do sistema..... | 49 |
| Figura 12: esquema de um laminado..... | 51 |
| Figura 13: laminado simétrico..... | 53 |
| Figura 14: representação da fibra | 54 |
| Figura 15: esquema para o calculo do módulo de elasticidade transversal..... | 57 |
| Figura 16: distribuição da orientação da fibra ao longo da espessura no compósito | 59 |
| Figura 17: Pontos de medição para o teste de rigidez a torção | 65 |
| Figura 18: Pontos de medição para o teste de rigidez a flexão | 66 |
| Figura 19: Abordagem de resistências para a transmissão de calor Fonte: Bergman, et al. 2011 | 68 |
| Figura 20: esquema do teste virtual de rigidez à torção | 71 |
| Figura 21: pontos de aplicação de carga no teste de rigidez à flexão..... | 71 |
| Figura 22: esquema do teste virtual de rigidez a flexão | 72 |
| Figura 23: curva de tensão x deformação do PA66 40% | 75 |
| Figura 24: Componentes atuais da caçamba | 76 |
| Figura 25: Componentes atuais da caçamba sem o restante da estrutura..... | 77 |
| Figura 26: Componentes atuais em detalhe..... | 77 |
| Figura 27: Pontos de medição de deslocamento no teste de rigidez a torção..... | 79 |
| Figura 29: Resultado da avaliação de sensibilidade dos componentes em relação a troca de material..... | 80 |
| Figura 30: Pontos de medição de deslocamento no teste de rigidez a flexão..... | 80 |
| Figura 31: Resultado da avaliação de sensibilidade dos componentes em relação a troca de material..... | 81 |
| Figura 32: Análise modal da caçamba. Regiões críticas a 93 Hz..... | 82 |

| | |
|---|----|
| Figura 33: Análise modal da caçamba. Regiões críticas a 98 Hz..... | 82 |
| Figura 34: Análise modal da caçamba. Regiões críticas a 106 Hz..... | 83 |
| Figura 35: Regiões de aplicação da força na análise localizada de rigidez..... | 83 |
| Figura 36: Partes em PA66 40% f. v. | 85 |
| Figura 37: Valores de rigidez a torção calculados | 86 |
| Figura 38: Tensões máximas no teste de rigidez a torção | 86 |
| Figura 39: Tensões máximas no teste de rigidez a torção na parte não modificada do veículo.. | 87 |
| Figura 40: Valores de rigidez a flexão calculados | 87 |
| Figura 41: Tensões máximas no teste de rigidez a flexão | 88 |
| Figura 42: Tensões máximas no teste de rigidez a flexão nas partes não modificadas do veículo | 88 |
| Figura 43 . Esquema da troca de calor nas superfícies da caçamba em PA66 40% f. v. | 90 |
| Figura 44. Conceito de resistência aplicado nas superfícies do pavimento da caçamba tradicional | 90 |
| Figura 45. Esquema da troca de calor nas superfícies da caçamba em PA66 40% f. v. | 92 |
| Figura 46: Conceito de resistência aplicado nas superfícies do pavimento da caçamba em PA66 40% f. v. | 92 |
| Figura 47: Curva de tensão x deformação do PA66 40% a 80°C | 93 |
| Figura 48: Curva de tensão x deformação do PA66 40% a 100°C | 93 |
| Figura 49: Interpolação para 88,5°C das curvas de 80°C e 100°C..... | 94 |
| Figura 50: Rigidez a torção a 88,5°C | 94 |
| Figura 51: Rigidez a flexão a 88,5°C | 95 |
| Figura 52: definição do limite de escoamento do PA66 40% a 88,5°C | 95 |
| Figura 53: Tensões máximas no teste de rigidez a torção a 88,5°C..... | 96 |
| Figura 54: Tensões máximas no teste de rigidez a flexão a 88,5°C..... | 96 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|--|----|
| Tabela 1: Dados da análise de mercado | 73 |
| Tabela 2: Materiais pesquisados | 74 |
| Tabela 3; Média dos módulos de elasticidade e da resistência à tração | 76 |
| Tabela 4: massa dos componentes da estrutura atual da caçamba | 78 |
| Tabela 5: Deslocamento máximo das regiões onde é aplicado o teste de rigidez localizada..... | 84 |
| Tabela 6: Peso dos componentes em PA66 0% f. v. | 85 |
| Tabela 7: Temperaturas calculadas pelas equações de transferência de calor | 92 |

LISTA DE ABREVIACÕES E SIGLAS

| | |
|-------|--|
| FCA | Fiat Chrysler Automobiles |
| EPA | Agência de Proteção Ambiental |
| CAFÉ | Media Corporativa de Economia de Combustível |
| GM | General Motors |
| SUV | Veículo Utilitário Esportivo |
| LFI | Injeo de fibras longas |
| PVC | Policloreto de Vinila |
| PA | Poliamida |
| PMMA | Polimetil Metacrilato |
| ABS | Acrilonitrila butadieno estireno |
| PC | Policarbonato |
| HDPE | Polietileno de Alta Densidade |
| LDPE | Polietileno de Baixa Densidade |
| VLDPE | Polietilenos de Muito Baixa Densidade |
| EVA | Etileno-Vinil Ester |
| RTM | Moldagem por Transferência de Resina |
| RIM | Moldagem por Injeo Reativa |
| BMC | <i>Bulk Moulding Compounds</i> |
| SMC | <i>Sheet Moulding Compounds</i> |
| GMT | Glass-mat reinforced thermoplastics |
| PBT | Polibutileno tereftalato |

RESUMO

Com as novas regulamentações sobre o setor automotivo que foram implementadas na União Européia em 2009 e que posteriormente foram adotadas no resto do mundo, as montadoras vêm buscando produzir carros mais eficientes para que essas regulamentações sejam atendidas. Uma das abordagens utilizadas para que os carros sejam mais eficientes é a redução de seu peso e dentro deste contexto a utilização de materiais mais leves é uma maneira de manter a performance do veículo e simultaneamente reduzir seu peso. Dentre as alternativas, os materiais compósitos se destacam pelas propriedades mecânicas adequadas para uso estrutural e baixa densidade, possibilitando a redução de massa. Algumas montadoras vêm utilizando os materiais compósitos nas caçambas de algumas de suas pick-ups. Quando aplicados a essa região do veículo, os materiais compósitos possibilitam a redução de partes pela integração de funcionalidades e, devido às grandes dimensões das caçambas nas pick-ups, promovem alto potencial de redução de peso. Após uma análise de mercado, foi observado que a completa substituição da estrutura metálica por compósitos pode tornar o veículo mais eficiente. Mantendo isso em mente, esse estudo foi feito com o objetivo de verificar a performance mecânica de uma pick-up quando a estrutura de sua caçamba é inteiramente substituída por compósitos. Essa avaliação foi feita em termos da rigidez global do veículo quando utilizando essas partes. Utilizando a poliamida 66 com 40% de fibra de vidro como o material estrutural que substituiria o aço, concluiu-se que esses materiais podem reduzir a massa dos componentes que substituem em mais cerca de 50%, além da diminuição do número de partes. A performance desses materiais mostrou-se, até o alcance técnico desse estudo, bastante satisfatória em termos da rigidez do veículo, mantendo essa sempre acima do valor de projeto, quando as análises foram consideradas em temperatura ambiente. Observou-se que o uso da poliamida 66 com 40% de fibra de vidro deve, no entanto, ser cauteloso quando em altas temperaturas, sendo necessária a otimização da geometria das partes, pois as propriedades mecânicas da poliamida se degradam com o aumento da temperatura.

Palavras Chaves: Compósito, redução de peso, setor automotivo, rigidez, PA66, fibra de vidro

1 INTRODUÇÃO

Com as novas regulamentações sobre o setor automotivo que foram implementadas na União Européia em 2009 e que posteriormente foram adotadas no resto do mundo, as montadoras vêm buscando produzir carros mais eficientes para que essas regulamentações sejam atendidas. Devido a esse fato, o uso dos polímeros reforçados tem se tornado mais amplo devido a possibilidade de adequarem-se a uma série de funcionalidades e ao mesmo tempo manterem a performance pretendida no veículo. Algumas montadoras utilizam materiais compósitos nas caçambas de suas pick-ups, o que possibilita a redução do número de partes e a redução da massa do veículo, tornando-o mais eficiente.

O objetivo deste trabalho é realizar o estudo da aplicação de materiais poliméricos reforçados nas caçambas, substituindo integralmente seus painéis metálicos. De forma mais específica, o trabalho busca:

- Ter uma visão de como está o uso de compósitos no setor automotivo;
- Selecionar materiais que possam ser utilizados estruturalmente na caçamba de uma pick-up, considerando os esforços nessa região do veículo e às condições ambientais pelas quais os componentes seriam submetidos;
- Estudar, de forma preliminar, o potencial da troca de materiais do veículo, no intuito de economizar peso, considerando a possibilidade de aglutinação de partes possibilitada por novas formas de processamento;
- Testar virtualmente a performance destes materiais, quando aplicados ao veículo, em termos de sua rigidez global, em temperatura ambiente;
- Definir uma temperatura crítica de operação, utilizando as equações básicas de transferência de calor e comparando os valores encontrados com aqueles sugeridos pelas normas internas FCA;
- Realizar os testes virtuais de performance, considerando a temperatura crítica que o componente externo plástico pode atingir;

A escolha de material é feita considerando materiais que possam ser encontrados no catálogo de materiais da FCA ou nos fornecedores. Além disso considera-se que as partes em polímero compósito seja processada por molde a injeção.

No capítulo 2 é feita uma revisão bibliográfica sobre o assunto, abarcando os polímeros em geral, polímeros reforçados, métodos de processamento cenário do setor automotivo e o uso dos polímeros no setor atualmente. Já no capítulo 3 apresenta-se a metodologia do trabalho, com o esquema dos modelos virtuais utilizados. No capítulo 4, tem-se o desenvolvimento do trabalho e os resultados obtidos para os testes tanto em temperatura ambiente quanto em temperaturas

críticas, bem como o cálculo dessas temperaturas críticas utilizando as equações de transferência de calor. Nos capítulos de fechamento, tem-se as principais conclusões e a lista de referências utilizadas.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 CENÁRIO DO SETOR AUTOMOTIVO

Antes de 1970 os polímeros não eram considerados como materiais de engenharia e eram utilizados na indústria automotiva inicialmente como cintos, mangueiras, carpetes e pneus. Hoje, os plásticos conseguiram penetrar nas aplicações de engenharia. Esse feito é, em parte, devido ao desenvolvimento de novos materiais como os compósitos poliméricos, que permitiram o seu uso em aplicações estruturais e que o peso dos veículos continuasse em geral no mesmo patamar apesar da adição de muitos componentes nos últimos 30 anos. (SEHANOBISH, 2009).

A indústria de materiais, incluindo os setores de polímeros e de metais, está se concentrando em inovar seus produtos de forma a atender os novos pré-requisitos de emissão. As primeiras regulamentações ambientais em carros ocorreram nos anos 60 na Califórnia e não eram motivadas pelo aquecimento global, mas pelos efeitos das emissões, consumo de energia, uso da terra e barulho na saúde humana. Os primeiros a legislar em favor da redução de emissão de gás carbônico devido às mudanças climáticas foram os membros da União Europeia, em 2009. Logo, essa tendência foi seguida pelo Japão, Coréia, China e Estados Unidos (NIEUWENHUIS e WELLS, 2015). As novas exigências foram impostas, nos Estados Unidos, pela Agência de Proteção Ambiental (EPA) através de normas desenvolvidas, batizadas de Média Corporativa de Economia de Combustível (CAFE). As regulamentações criadas por essas entidades forçam a indústria a se adaptar, mesmo ainda se recuperando da crise financeira global de 2008, fazendo-a procurar meios de satisfazer as normas sem elevação demasiada do custo do produto (AMERICAN CHEMISTRY COUNCIL, 2014). Essas novas regulamentações são redigidas no intuito de fazer com que os automóveis emitam menos CO_2 . Estima-se que, caso veículos tenham redução de 30% do peso de sua estrutura, em um mercado como o do Reino Unido, onde entram 2.3 milhões de veículos por ano, o consumo de combustível seria reduzido em 915 milhões de litros, enquanto a emissão de CO_2 seria reduzida em 2.3 milhões de toneladas. (NJUGUMA, 2016)

A redução do peso dos veículos tem consequências em seu custo. Um estudo da empresa ArcelorMittal aponta o quanto o uso de novos materiais pode acrescentar em custo nos novos veículos. Segundo esse estudo, o uso de aço avançado de alta-resistência, pode aumentar o custo do veículo em \$0,30 para cada libra de peso economizada, enquanto a utilização de alumínio aumentaria esse custo em \$2,71 por libra. Polímeros reforçados por fibra de carbono,

por sua vez, seriam responsáveis por um aumento de \$4.87 por quilo economizado (ZUIDEMA, 2013). Em termos de redução de peso através de mudanças para metais de alto desempenho, a estratégia da montadora pode afetar muito no custo final. A Ford, por exemplo, conseguiu cortar 700 libras de sua F-150 mudando sua estrutura de aço para alumínio, mas foi obrigada a investir 1 bilhão para modernização da fábrica. A GM, por sua vez, reduzindo o peso de seu Cadillac CT6, usa para soldar alumínio os mesmos robôs que soldam aço, reduzindo em muito os custos de investimento. (TRUETT, 2016)

A indústria de polímeros compósitos tem desenvolvido uma grande variedade de materiais de alta performance, que a tem feito a preferida de setores como Motorsport e aeroespacial. Esses materiais possuem baixo peso, alta resistência e rigidez específicas e permitem projetos aerodinamicamente mais ousados. Além disso, alguns polímeros compósitos oferecem uma inigualável absorção de energia por unidade de massa. Na Europa, polipropileno ou policarbonato misturado com polibutileno tereftalato já foram incorporados aos pára-choques para que sejam atingidas, além das normas em relação à emissão de CO_2 , as diretrizes de proteção ao pedestre (AMERICAN CHEMISTRY COUNCIL, 2014).

Um dos compósitos poliméricos que mais se destacam na performance e redução de peso são os reforçados com fibra de carbono. Se antes era apreciado apenas pela indústria aeronáutica e de Motorsport, agora chama a atenção de todas montadoras, já que seu custo tem caído dramaticamente graças ao avanço dos fornecedores em acelerar seu meticuloso e custoso processo de cura. Enquanto ainda não se equipara ao preço do aço e alumínio, seu peso é 50% menor do que o primeiro e 30% menor do que o segundo, tornando-o adequado para carros elétricos e esportivos.

As partes em fibra de carbono têm alto custo em grande parte devido ao seu processo extenso e trabalhoso. Camadas de resina e fibra de carbono são posicionadas na forma desejada e levadas à autoclave, num processo que pode demandar horas na produção de uma simples peça. Graças a novas tecnologias em desenvolvimento, apenas alguns minutos são necessários na produção de uma peça (SEDGWICK, 2011).

Buscando alternativas em materiais leves, os fornecedores europeus de painéis de portas, encosto de assentos, painéis de instrumentos e interiores, aderiram à ideia de utilizar materiais poliméricos reforçados por fibras naturais. Fibras de juta, linho e cânhamo ajudam na redução de peso, redução de emissão de CO_2 e de custo. A SUV Pilot, da Honda, utiliza fibras de madeira no pavimento do veículo, enquanto uma mistura de linho com fibra kenak pode ser encontrada nos painéis do Saturn L300. Além disso, o compartimento de carga da Chevrolet Trailblazer também utiliza fibra de madeira. No entanto, a aceitação das fibras naturais é complicada para aplicações estruturais devido a necessidade de um bom acabamento de

superfície e sua baixa capacidade de aderir à matriz, limitando as propriedades do compósito (HOLBERY e HOUSTON, 2006). Além disso, os benefícios ambientais de se usar fibras naturais em larga escala ainda são questionáveis, sendo um potencial degradante da biodiversidade e com efeitos duvidosos sobre a mudança climática (ADEKOMAYA, JAMIRU, *et al.*, 2017).

No geral, as vantagens oferecidas por compósitos são: redução de partes devido a integração de funcionalidades em menos peças; redução de peso e adequação às necessidades dos clientes em relação à segurança e conforto; fácil produção, sendo que a alteração de uma peça implica em pouca alteração nas ferramentas de produção; redução de ruído; possibilidade de manufatura de peças com alto acabamento, eliminando custos nas fases finais de montagem (BIRON, 2004).

Apesar das vantagens oferecidas pelos compósitos poliméricos, satisfazendo as necessidades tecnológicas das montadoras, algumas barreiras ainda bloqueiam seu uso em larga escala. A primeira delas é o custo, já mencionado. Essa elevação de custo tem como origem tanto o preço da peça obtida do fornecedor, que é mais caro, quanto na mudança requerida na infraestrutura das montadoras, otimizadas durante décadas para acomodar a montagem em metais. Algumas partes da montagem, por exemplo, são realizadas em altas temperaturas, de até 200°C, que são proibitivas para compósitos poliméricos devido a sua relativamente baixa resistência ao calor.

Para contornar o problema dos custos, algumas empresas estão oferecendo soluções híbridas. A empresa PlastiComp, em 2015, anunciou compósitos híbridos de fibra de vidro mais fibra de carbono. Esse material ofereceria propriedades melhores do que os exclusivamente feitos de fibra de vidro, sem um aumento muito pronunciado no custo devido aos baixos conteúdos de carbono. (CALIENDO, 2015)

O segundo impedimento é a dificuldade de reciclagem desses compósitos, em parte devido à grande variedade desses. De 1995 a 2014, a quantidade percentual de polímeros usados no veículo cresceu em relação ao aço. O uso de plásticos e polímeros compósitos passou de 6.5% para 8.2% nesse período, enquanto o uso de borrachas, passou a representar de 4% a 4.9%. O uso de aço, por sua vez, caiu de 44.1% para 34.5% (DAVIS, WILLIAMS e BOUNDY, 2016). Dessa forma, apesar da redução no peso dos carros, existe o aumento do desperdício do material após o fim de sua vida útil, já que a infraestrutura de desmanche e reaproveitamento foi construída para os metais e os materiais poliméricos acabam sendo aterrados. (THOMAS, JOSEPH, *et al.*, 2012)

Outro fator que afeta a adoção dos materiais poliméricos compósitos é a deficiência na integração da cadeia de fornecedores com as montadoras. Os fornecedores frequentemente não estão conscientes das reais necessidades das montadoras para desenvolver novos materiais, enquanto essas últimas não recebem dados suficientes dos fornecedores sobre os produtos, preferindo continuar com materiais tradicionais. Além disso, faltam modelos que sejam aceitos pela indústria automotiva e que provem que a adoção de materiais poliméricos, apesar dos elevados custos dos materiais envolvidos, tenha seu preço suavizado por outros fatores do sistema como custo de fabricação da parte, montagem e manutenção. (AMERICAN CHEMISTRY COUNCIL, 2014)

Por último é necessário citar os longos ciclos necessários para a fabricação de uma peça em material compósito. Apesar de alguns avanços na manufatura de polímeros, como o processo LFI (injeção de fibras longas), que automatiza grande parte do processo e o acelera, os tipos de processamento pelos quais passam os compósitos poliméricos são lentos demais para a indústria automotiva. Os processos mais rápidos, como moldagem a compressão, produzem peças a uma velocidade de 30 a 60 segundos, mas apresentam características indesejáveis como baixo teor de fibra uniformemente espalhada pelo polímero, qualidade estrutural baixa e qualidade superficial também baixa. (GHASSEMIEH, 2011)

2.2 POLÍMEROS

Os polímeros são moléculas longas de hidrocarbonetos e são referidas como macromoléculas. São formadas pela repetição de unidades chamadas monômeros. A quantidade de repetições n dos monômeros é chamada de grau de polimerização (Ulmann's Polymers and Plastics: Products and Processes, 2016). O polietileno, por exemplo, é um monômero cuja unidade é o etileno. O teflon, cujo nome não comercial é politetrafluoretileno, é um polímero cujos monômeros são tetrafluoretileno. Na prática, os polímeros são muito complexos, com muitas variações químicas, incluindo variações no peso molecular, ramificações, interconexões e muitos tipos de defeitos químicos (PEACOCK e CALHOUN, 2006).

Algumas das propriedades mecânicas e térmicas dos polímeros são sensíveis à habilidade do polímero de rodar ou torcer sobre si mesmo. Essa habilidade varia muito com os monômeros envolvidos nas ligações. Monômeros que possuem ligações duplas são rígidos em relação a torção e monômeros que possuem lados com átomos mais pesados também apresentam uma maior resistência a torção. Como o polímero possui muitas variações em sua composição, suas propriedades são dadas por uma distribuição estatística de suas configurações (CALLISTER JR. e RETHWISH, 2014).

No início da utilização dos polímeros para fins comerciais, os polímeros eram de origem biológica devido à baixa eficiência de processos de sintetização. Hoje, a maioria dos polímeros

é sintetizada a partir de monômeros sintéticos. Por causa do progresso da biotecnologia e da busca por fontes renováveis de materiais, a sintetização de monômeros a partir de componentes biológicos, ao invés de derivados de petróleo, tem sido estimulada (Ulmann's Polymers and Plastics: Products and Processes, 2016).

2.3 CATEGORIAS QUÍMICAS DE POLÍMEROS

2.3.1 *Polímeros termoplásticos*

São polímeros cujas cadeias de moléculas não possuem ligações permanentes com suas cadeias vizinhas, sendo quimicamente independentes (BIRON, 2013). A grande característica dos polímeros termoplásticos é que, quando aquecidos, se tornam viscosos e podem ser moldadas novamente, tornando-as recicláveis. Esses polímeros podem ser formados tanto pelo processo de adição quanto de condensação. O polietileno é um exemplo de polímero termoplástico sintetizado pelo processo de adição, enquanto o Nylon 66 é um termoplástico formado pelo processo de condensação. (PEACOCK e CALHOUN, 2006).

Frequentemente alguns aditivos são adicionados aos termoplásticos, visando a melhora em algumas de suas propriedades, como estabilidade química e térmica ou resistência à radiação ultravioleta. Algumas vantagens dos termoplásticos é que estes são facilmente conformados quando em altas temperaturas, podem ser reprocessados várias vezes, o que os torna recicláveis, e possuem processamento de fácil monitoramento devido à sua natureza puramente física (BIRON, 2013).

2.3.2 *Polímeros Termofixos*

São polímeros cujas cadeias possuem ligações químicas permanentes com as cadeias adjacentes. Esses polímeros não podem ser amolecidos por meio de aquecimento, como no caso dos polímeros termoplásticos. São criados através da polimerização por meio de condensação ou por adição de ligações cruzadas. (PEACOCK e CALHOUN, 2006).

Uma das vantagens dos termofixos é que estes se degradam em altíssimas temperaturas ao invés de amolecerem, o que é uma certa vantagem em relação ao fogo pois eles não escorrem, constituindo uma espécie de barreira. Outra vantagem é que seu processamento, no geral, exige equipamentos mais simples (BIRON, 2004).

2.4 PROPRIEDADES MECÂNICAS E FÍSICAS DOS POLÍMEROS

As propriedades mecânicas dos polímeros que são de interesse são as mesmas que costumam ser obtidas dos metais, como módulo de elasticidade e resistência. Normalmente, se usa o ensaio de tração tradicional para a obtenção dessas propriedades, a não ser que o material possua propriedades incomuns, como as borrachas, que têm elevada deformação quando tracionadas ou comprimidas. Essas propriedades mecânicas são sensivelmente alteradas pela velocidade da aplicação da força e pelas condições ambientais, sobretudo a temperatura. (CALLISTER JR. e RETHWISH, 2014).

2.4.1 *Fratura de polímeros*

Em geral, os termofixos apresentam fratura frágil, normalmente iniciadas em concentradores de tensão.

Já para os polímeros termoplásticos, a fratura pode acontecer tanto de forma dúctil quanto frágil. Em baixas temperaturas, abaixo da temperatura de transição vítrea, os termoplásticos se comportam de maneira frágil, rompendo sem apresentar escoamento. A medida que a temperatura aumenta, esse comportamento se modifica e o polímero começa a apresentar deformação plástica antes de se romper, sendo que esse comportamento aumenta sensivelmente com o aumento da temperatura. A velocidade de deformação também influencia no tipo de fratura, sendo que taxas de deformação mais elevadas favorecem fraturas frágeis. (CALLISTER JR. e RETHWISH, 2014).

A caracterização da fratura dos polímeros é tradicionalmente feita com o mesmo método do trabalho essencial de fratura (EWF), utilizado também em metais. Nesse método, assume-se que a energia consumida em uma fratura pode ser dividida em duas, a energia necessária para a criação da fratura, chamada trabalho essencial, e a energia dissipada na deformação plástica de parte do material, chamada energia não essencial (CUESTA e ALEGRE, 2016). Essa caracterização é feita por um ensaio de tração em um espécimen duplamente entalhado, como presente na norma ASTM D6068 (CORREA, YAMAKAWA, *et al.*, 2007).

2.4.2 *Resistência ao impacto*

Polímeros podem apresentar fratura dúctil ou frágil quando submetidos à uma carga de impacto. As características mais procuradas em um polímero quando se trata de impacto é uma alta resistência em temperatura ambiente e temperatura de transição vítrea abaixo desta.

Um dos testes feitos para testar a resistência ao impacto do material é aquele de baixa velocidade cujas diretrizes estão na norma ISO 6603. Nesse ensaio, um peso é deixado cair, de variadas alturas, sobre uma placa do material sob análise, de onde é medida a energia de impacto (SHANKAR, SHIVANAND e KUMAR, 2013). Outros métodos para a medição da energia de impacto é o ensaio Charpy (NISHI, TSUCHIKURA, *et al.*, 2012) e o ensaio Izod (NAM, PARK e KIM, 2015).

2.4.3 *Fadiga*

Alguns polímeros apresentam uma curva de resistência à fadiga com forma semelhante à dos metais, com um limite de resistência a fadiga, abaixo do qual, teoricamente, o polímero não fraturaria por fadiga. Outros polímeros não apresentam esse patamar, tendo sua vida em termos de ciclos gradativamente diminuída com o aumento da tensão. Os valores das resistências a fadiga e do limite de resistência a fadiga dos plásticos são muito menores do que os dos metais (CALLISTER JR. e RETHWISH, 2014).

Os testes de fadiga em polímeros são realizados da mesma forma com que é feito nos metais, ou seja, peças padronizadas são submetidas a tensões cíclicas até sua ruptura. Testes de fadiga foram feitos em polímeros comumente utilizados no setor automotivo (polipropileno, polipropileno misturado com elastômero e silicato de magnésio, polibutileno tereftalato reforçado com fibra de vidro e poliamida 6 reforçada com fibra de vidro). Uma das conclusões é a independência da resistência à fadiga em relação à direção do escoamento no processo de injeção em materiais não reforçados (MORTAZAVIAN e FATEMI, 2015)

2.4.4 *Deformação Elástica*

A deformação elástica se dá pelo alinhamento das moléculas que estão na região amorfa do polímero, enquanto na região laminar, ocorre a deflexão e estreitamento das ligações covalentes, aumentando ligeiramente a espessura das lamelas.

Em uma temperatura intermediária, os polímeros apresentam um comportamento que está entre um vidro e um líquido viscoso. Esse comportamento intermediário é chamado de comportamento visco-elástico. (CALLISTER JR. e RETHWISH, 2014). Quando um polímero apresenta um comportamento visco-elástico, a sua resposta em relação a imposição de uma tensão ou uma deformação não é imediata. Assim, aplicando um determinado valor de tensão, a deformação do polímero evolui com o tempo, de onde podemos definir o Parâmetro de Fluência E_r como:

$$E_r(t) = \frac{\sigma_0}{\epsilon(t)} \quad (1)$$

Por outro lado, aplicando uma deformação constante, a tensão que deve ser exercida no ensaio pode variar com o tempo no comportamento visco-elástico. Dessa forma pode-se definir o Módulo de Relaxação E_c como:

$$E_c(t) = \frac{\sigma(t)}{\epsilon_0} \quad (2)$$

Os dois parâmetros são muito sensíveis à temperatura e ambos decrescem com o aumento desta (CALLISTER JR. e RETHWISH, 2014).

2.4.5

2.4.6 *Deformação Plástica*

A deformação plástica se inicia quando as ligações entre as lâminas da região cristalina começam a se quebrar, fazendo com que estas deslizem uma em relação a outra e a região cristalina se deforme tendendo a se alinhar ao eixo de aplicação da força. Prosseguindo com o aumento da carga, essa região cristalina se separa em blocos menores. Esses blocos e as moléculas da região amorfa se alinham ainda mais com o eixo de aplicação da força, ocasionando em um enrijecimento do material nessa direção (CALLISTER JR. e RETHWISH, 2014).

2.4.7 *Cristalização*

Ocorre pelo ordenamento das moléculas inicialmente em uma disposição aleatória quando a temperatura está abaixo de um determinado valor. A taxa de cristalização varia de acordo com a temperatura em que o polímero se encontra e com seu peso molecular.

Depois da primeira teoria sobre os mecanismos de cristalização, proposta em 1960, muitos projetos de pesquisa emergiram e conseqüentemente muitas opiniões controversas surgiram. Muitas dessas controvérsias ainda não foram resolvidas e os detalhes do processo de cristalização dos polímeros ainda continuam não muito bem esclarecidos. Tendo em vista que avanços foram feitos com o aumento do poder de simulação computacional, alguns trabalhos objetivam resumir as teorias e os avanços propostos até então, no intuito de promover uma discussão lógica sobre a cristalização de polímeros e o esclarecimento de aspectos confusos das teorias (ZHANG, GUO e XU, 2017).

2.4.8 Temperatura de Fusão

Ocorre quando um polímero sólido e cristalizado se torna um fluido viscoso com disposição molecular randômica. Essa transição se dá pelo aumento de temperatura. Diferentemente dos metais, a fusão dos polímeros se dá em uma faixa de temperaturas e essa temperatura depende do histórico do material.

A temperatura de fusão é estreitamente relacionada á forma e composição química da molécula. Moléculas rígidas, com ligações duplas, tem mais dificuldade para se locomover e sair de uma estrutura cristalina para uma amorfa, aumentando a temperatura de fusão T_m . Os tipos e o tamanho dos grupos laterais também influenciam no mesmo sentido.

A temperatura T_m também é afetada pelo peso molecular, quanto maior este, maior a temperatura de fusão. T_m , como dito anteriormente, corresponde a uma faixa de temperaturas, pois é dependente do peso molecular e dentro do mesmo polímero existem moléculas com uma variedade de pesos. (CALLISTER JR. e RETHWISH, 2014).

2.4.9 Temperatura de transição vítrea

Quando um polímero amorfo ou semicristalino passa de um estado líquido para um material borrachoso e daí para um polímero rígido. A temperatura na qual o polímero se torna rígido se chama temperatura de transição vítrea. Ao contrário da fusão, esse processo acontece como consequencia do resfriamento e não do aquecimento.

A temperatura de transição vítrea é influenciada pelos mesmos fatores que influenciam a temperatura de fusão. Basicamente altera de acordo com a rigidez e forma molecular e com o peso molecular.

A temperatura de transição vítrea pode ser observada no material quando este está em estado amorfo, apresentando um aumento na taxa de crescimento do volume específico com a temperatura. Já a temperatura de fusão pode ser observada quando o polímero se encontra em seu estado cristalino, apresentando uma descontinuidade no seu volume específico quando passa por essa temperatura. (CALLISTER JR. e RETHWISH, 2014)

2.5 FATORES QUE INFLUENCIAM AS PROPRIEDADES DOS POLÍMEROS

2.5.1 Peso molecular

Apesar de o peso molecular não afetar significativamente o módulo de elasticidade do polímero, afeta a resistência à tração, fazendo com que esta aumente com o aumento do peso molecular,

devido ao aumento do tamanho das moléculas e de seu emaranhamento. (CALLISTER JR. e RETHWISH, 2014)

2.5.2 Grau de cristalinidade

O aumento da cristalinidade tem como consequência uma maior região de moléculas ordenadas em relação à região amorfa. Nessas regiões existem maior quantidade de ligações entre moléculas adjacentes. Com o aumento delas, tanto o módulo de elasticidade quanto a resistência do material aumentam significativamente. Outro efeito da cristalinidade é tornar o material menos dúctil (CALLISTER JR. e RETHWISH, 2014).

2.5.3 Predeformação por Drawing

Os polímeros semicristalinos quando pré-deformados, apresentam um aumento do módulo de elasticidade e da resistência à tração na direção do estiramento devido ao alinhamento das moléculas. Os polímeros amorfos obtêm esse efeito após a deformação caso o material seja rapidamente resfriado após o processo. Na região transversal ao estiramento, a resistência a tração desses materiais diminui (CALLISTER JR. e RETHWISH, 2014).

2.5.4 Recozimento

O recozimento faz com que os polímeros não estirados tenham um aumento no módulo de rigidez, aumento na resistência à tração e decréscimo na ductilidade. Nos materiais estirados, o módulo de elasticidade diminui com o recozimento (CALLISTER JR. e RETHWISH, 2014).

2.6 TIPOS DE POLÍMEROS

2.6.1 Plásticos

São de uso geral e apresentam alguma rigidez estrutural. Têm propriedades variadas, sendo alguns frágeis e rígidos, outros flexíveis, com deformação elástica e plástica. Apresentam algum grau de cristalinidade e são usados abaixo de temperatura de transição vítrea, se amorfos, ou abaixo da temperatura de fusão, no caso de semicristalinos. Devem, sobre tudo ter rigidez necessária para manter sua forma. (CALLISTER JR. e RETHWISH, 2014)

Alguns plásticos apresentam características extraordinárias, como transparência, no caso do poliestireno. Já os fluorcarbonetos apresentam baixo coeficiente de fricção e resistentes a ataques químicos, sendo utilizados em utensílios de cozinha como anti-aderente (CALLISTER JR. e RETHWISH, 2014).

2.6.2 Elastômero

A característica principal do elastômero consiste em sua capacidade de se deformar muito, plasticamente e elasticamente, antes de se romper. A borracha natural ainda é muito utilizada. O

elastômero mais importante, no entanto, é o SBR, utilizado em pneus e reforçado com carbono preto (CALLISTER JR. e RETHWISH, 2014).

2.6.3 Fibras

São polímeros que podem ser estirados, aumentando sua resistência na direção do estiramento. São mais usados na indústria têxtil, mas a aramida, por exemplo, é amplamente usada em materiais compostos. As moléculas dos polímeros usados para a fabricação de fibras devem ter alta cristalinidade e alto peso molecular para que sejam estiradas sem que se rompam (CALLISTER JR. e RETHWISH, 2014).

2.6.4 Revestimentos

São coberturas que tem como grande parte de ingredientes os polímeros, tendo a função de isolar o componente do ambiente, prover melhor acabamento e isolamento elétrico (CALLISTER JR. e RETHWISH, 2014).

2.6.5 Adesivos

São substâncias que mantêm unidas as superfícies de dois sólidos. Os adesivos podem ser mecânicos, realizando a união pelo endurecimento nos poros do aderente, ou química, com ligações químicas com o aderente.

Adesivos sintéticos incluem poliuretanos, epóxis, acrílicos e são escolhidos de acordo com as características da colagem: os materiais aderentes e suas porosidades, colagem temporária ou permanente, temperaturas máximas e mínimas de exposição.

Suas vantagens incluem o baixo peso, melhor resistência à fadiga e baixo custo de fabricação. A desvantagem é que os adesivos possuem baixas temperaturas de operação, perdendo suas características mecânicas quando expostos à altas temperaturas (CALLISTER JR. e RETHWISH, 2014).

2.6.6 Filmes

São polímeros encontrados com espessuras muito reduzidas e com alta flexibilidade, alta resistência à rasgamento e umidade. Eles são comumente utilizados como embalagens de alimentos e em outras muitas utilidades. Incluem, polietileno, polipropileno e celofane (CALLISTER JR. e RETHWISH, 2014).

2.6.7 Espumas

São materiais que possuem um alto volume de poros e bolhas de ar, sendo compostos tanto por termoplásticos como por termofixos. Servem como almofadas em móveis e em automóveis, assim como isolamento térmico e embalagem (CALLISTER JR. e RETHWISH, 2014).

2.7 PROCESSAMENTO DE POLÍMEROS

Os métodos utilizados para o processamento de polímeros dependem de: (1) Se o material utilizado for termoplástico ou termofixo, (2) Se termoplástico, da temperatura na qual funde, (3) Da estabilidade atmosférica do material sendo processado e (4) da geometria e do tamanho desejado para o produto final.

Termoplásticos se formam acima de suas temperaturas de transição vítrea, se amorfos, ou acima de seu ponto de fusão, se cristalinos. Pressão deve ser aplicada a medida que a peça resfrie para que essa mantenha seu formato.

Já a produção de materiais termofixos ocorrem mediante duas etapas: preparação de um polímero linear, em estado líquido e cura deste polímero dentro de sua forma final por meio de aquecimento e/ou adição de catalisadores. (CALLISTER JR. e RETHWISH, 2014)

2.7.1 *Moldagem por compressão*

A quantidade necessária do polímero e seus aditivos são derramados entre as partes macho e fêmea do molde, ambas aquecidas, porém apenas uma sendo móvel. O molde é fechado e aquecido, fazendo com que o plástico flua e se conforme ao molde. Pode ser usado tanto para termoplásticos quanto para termofixos, mas seu uso para termoplásticos demanda muito mais tempo e custo do que as outras técnicas de injeção e extrusão (PEACOCK e CALHOUN, 2006).

2.7.2 *Extrusão*

A maioria dos polímeros são inseridos por gravidade na máquina, através de um funil, em forma de grãos. Em alguns casos o material a ser extrudado é composto por uma miscelânea de substâncias, como mais de um tipo de polímero, pigmentos e outros aditivos. Nesse caso, funis subsidiários são instalados para alimentar o funil principal com a proporção exata de componentes. Algumas vezes, uma broca age de forma a vibrar o funil, para que os grãos não se bloqueiem e a alimentação cesse (PEACOCK e CALHOUN, 2006).

Esse material é empurrado ao longo de um barril por uma rosca e durante esse processo uma mistura de aquecimento externo e trabalho mecânico (fricção entre o polímero e o barril) derrete o polímero. Em alguns casos, se o polímero processado é muito viscoso, é necessário que o barril seja resfriado e perca uma parcela de calor. O aquecimento pelo qual o polímero passa também tem o papel de homogeneizar o material. A fusão do polímero ocorre primeiramente nas paredes do barril, onde a fricção e o calor externo têm maiores valores. A medida que o fundido avança, a seção transversal do canal por onde o polímero flui diminui, compactando-o e expelindo o ar que estava entre os grãos.

No processo de extrusão, para cada tipo de polímero, é necessário um tipo de rosca diferente. No caso do PVC rígido, se a extrusora for alimentada com sua forma peletizada, o comprimento da rosca em relação ao seu diâmetro pode ser menor do que 22:1, já no caso do poliestireno amorfo, devido a sua fácil processabilidade, essa relação pode ser de 12:1. (MANRICH, 2005).

O polímero fundido é então transmitido à uma porção chamada zona de dosagem, onde há o controle da quantidade de polímero e da pressão com que esse será extrudado, de forma a obter o melhor produto final. Após a rosca, ainda se utiliza uma grelha que além de ajudar no controle da pressão filtra qualquer eventual corpo estranho. Logo após, é forçado através de uma matriz, onde toma a sua forma final. Sua solidificação se dá com a ajuda de sopradores, spray ou banho.

É uma técnica mais apropriada quando se deseja um material perfil constante, como juntas de geladeira ou tubos. Também é muito utilizada na fabricação de placas, filmes, capas de fios e fibras. É utilizada também para a produção de pastilhas poliméricas compostas de diferentes substâncias para posterior processamento. Na indústria automotiva, é principalmente utilizado como capa dos fios elétricos e na confecção de placas e filmes poliméricos que são conectadas a partes moldadas por injeção por meio de poliuretano para fins decorativos (KAUFFMAN e ZIEGLER, 2015).

2.7.3 Moldagem por injeção

A técnica mais utilizada para o processamento de termoplásticos, mas também pode ser utilizada com termofixos. A moldagem por injeção de termoplásticos é a origem dos processos de injeção e foi introduzida nos anos 50. Ao contrário da extrusão, esse tipo de processamento é utilizado para peças discretas. Nesse processo os produtos precisam de pouco ou nenhum trabalho de acabamento (KAUFFMAN e ZIEGLER, 2015).

Basicamente, na injeção de termoplásticos, o polímero fundido é inserido dentro de um molde e então tempo suficiente é dado para que o material esfrie e solidifique, quando o molde pode ser aberto e o produto retirado. Assim como na extrusão, um funil alimenta um cilindro da quantidade necessária de material. Dentro do cilindro, este material é puxado e pressionado contra a parede aquecida por uma rosca, derretendo o polímero. A diferença é que no caso de molde por injeção, a medida que a rosca gira e empurra o polímero, ela se move para trás, deixando um reservatório de material a sua frente. Quando a rosca é empurrada para frente, o material é então forçado a alta pressão, normalmente de 500 a 2000 bar, para a cavidade do molde, onde se solidifica. Válvulas previnem o retorno do polímero pelos filetes da rosca. O molde abre e a peça é expelida, podendo o ciclo ser reiniciado.

Durante a moldagem, o fluxo que entra em contato com as paredes do molde se solidifica instantaneamente, enquanto a porção central abre caminho pelo molde. Caso muito fluido seja injetado, o fluido pode adentrar a região de contato entre as duas peças de molde e produzir uma peça com rebarbas, se contrariamente pouco fluido for injetado, o fluido pode solidificar antes de atingir todos os confins da cavidade do molde e a peça produzida será incompleta. Durante a solidificação, o parafuso ainda exerce pressão sobre o restante de polímero fundido para que esse entre no molde e preencha os espaços deixados pela contração do polímero em resfriamento (PEACOCK e CALHOUN, 2006). Estando a cavidade do molde preenchida, enquanto a peça esfria e solidifica a rosca volta a processar os grãos de polímero e acumulá-lo para uma nova peça. Uma vez solidificada, a peça é ejetada do molde e polímero fundido é injetado novamente, reiniciando o ciclo. A solidificação no interior acontece rapidamente, reduzindo o tempo do ciclo para um valor entre 10s e 30s. Ao entrar no molde por um canal, o polímero não pode se solidificar. Isso pode ser conseguido de duas maneiras: aumentando o diâmetro do canal ou aquecendo-o. O segundo modo costuma ser muito oneroso, motivo pelo qual o primeiro é mais frequentemente utilizado, porém as peças produzidas no primeiro modo são injetadas com uma rebarba que posteriormente deve ser removida.

No caso de termofixos, a rosca não exerce trabalho de aquecimento e fricção do material, tendo apenas o papel de misturar os reagentes. Também não exerce tanta pressão sobre o material devido à sua baixa viscosidade quando não curado. Uma vez que a mistura seja injetada no molde, esse é aquecido até a temperatura de cura, algo entre 150°C e 200°C e quando 80% do processo das ligações cruzadas do material estiverem efetuadas, este pode ser retirado do molde (KAUFFMAN e ZIEGLER, 2015).

Existem algumas variações da moldagem por injeção que são de especial interesse da indústria automotiva. A moldagem por injeção de múltiplos componentes é uma delas pode injetar componentes de diversas cores um dentro do outro, como é feito nas lanternas traseiras de automóveis utilizando PMMA (polimetil metacrilato). Já no caso da moldagem por injeção com o auxílio de gás, gases inertes são injetados no núcleo do polímero, forçando-o contra as paredes do molde e deixando seu centro oco, economizando material e reduzindo seu peso. Esse processo é utilizado por exemplo em seguradores de teto dos automóveis. Por último, tem-se ainda o processo MuCell, desenvolvido pela companhia Trexel. No MuCell, Nitrogênio em um estado supercrítico é injetado no molde junto com o polímero, criando micro-vazios que reduzem o tempo do processo, melhora a qualidade da peça e reduz seu peso. É utilizado em cobertura de válvulas de motores (KAUFFMAN e ZIEGLER, 2015).

2.7.4 *Moldagem por sopro*

Processo utilizado para produção de garrafas, jarros e outros recipientes e é semelhante à fabricação desses mesmos produtos em vidro (PEACOCK e CALHOUN, 2006). Tem grande presença no cotidiano e pode ser encontrado em embalagens de shampoo, óleo de cozinha, sabonete líquido e fluidos automotivos. Possui duas variantes, a moldagem por sopro via extrusão ou a moldagem por sopro via injeção.

Na primeira, um tubo é extrudado pelo processo que já foi mencionado anteriormente. Em seguida, ainda em estado semi-fundido, ar é soprado dentro desse tubo, que se expande e preenche a cavidade do molde em que se encontra. No caso da moldagem por sopro via injeção, uma pré-forma é produzida via moldagem por injeção, em seguida, ar é soprado dentro dessa pré-forma, fazendo com que essa se conforme à cavidade do molde.

Muito cuidado deve ser tomado no projeto de um processo de molde por sopro, evitando espessuras muito finas que posteriormente seriam fonte de fratura. Por esse motivo, produtos fabricados por esse processo normalmente tem contornos arredondados, evitando fragilidades. Quando a peça extrudada ou injetada é soprada dentro do molde, o ar que se encontrava nessa posição é empurrado. Para evitar que esse seja comprimido dentro do molde e estrague o produto, são criados meios para que o ar seja ventilado para fora, como orifícios e plugues porosos. (PEACOCK e CALHOUN, 2006)

A moldagem por sopro tira vantagem da resistência que alguns polímeros apresentam quando fundidos, permitindo que formem bolhas de parede fina sem se romperem, como o polietileno e o polietileno tereftalato (PEACOCK e CALHOUN, 2006).

Uma parte de veículo que usualmente feita por esse processo na indústria automotiva são os tanques de combustível plásticos. Nesse processo, os tanques podem ter geometrias mais complexas e são boas alternativas aos tanques de aço ou alumínio. São geralmente feitos de polietileno de alta densidade. (KAUFFMAN e ZIEGLER, 2015)

2.7.5 *Moldagem por rotação*

Nesse processo, o polímero é derramado na parte interior de um molde em rotação. Essa rotação espalha o polímero pela superfície do molde. Esse processo é adequado à produção de cascas de polímeros. Esse processo é vantajoso em relação ao processo de moldagem por injeção ou moldagem por sopro no que diz respeito a gerar produtos sem marcas de solda e com orientação molecular mínima. Esse processo consiste basicamente em quatro etapas.

A primeira etapa do processo consiste em carregar o molde com a quantidade necessário de polímero. Esse polímero normalmente vem na forma de pó fino ou plastisol, uma suspensão de

resina em pó. Essas duas formas permitem que polímero flua pela superfície do molde rotativo, cobrindo toda a superfície.

A segunda parte consiste na rotação do molde. Este é colocado dentro de um forno. As rotações podem acontecer em 360° em torno de dois eixos ou em torno de um só eixo enquanto o molde balança em torno do outro eixo sendo adequado para produtos de grande alongamento. Enquanto rotaciona, o molde se aquece e conseqüentemente o polímero em grãos se espalha pela sua superfície enquanto funde e forma um filme que cobre o molde.

Uma vez que o polímero tenha tomado a forma da peça o molde é retirado do forno e resfriado. Isso acontece com a ajuda de jato de ar ou água. O tempo de resfriamento depende da espessura da peça, da resina e do material de que foi feito o molde.

Uma vez resfriada a peça é finalmente liberada do molde. Algumas vezes isso é feito com a ajuda de agentes lubrificantes que são espalhados pela cobertura do molde antes do derramamento do polímero (PEACOCK e CALHOUN, 2006).

Os produtos gerados por esse processo são geralmente: tanques de gasolina, tanques de armazenamento agrícolas ou industriais, manequins e caixas de armazenamento de pick-ups. Alguns brinquedos como bolas e partes de bonecas também são fabricados com esse método. Na indústria automotiva, produz peles decorativas de PVC e tanques de combustível (KAUFFMAN e ZIEGLER, 2015).

2.7.6 Termoformagem

É um processo muito utilizado para transformação de chapas de polímeros em peças tridimensionais com paredes finas. Termoformagem é um processo secundário pois, primeiro, chapas de polímero são formadas por extrusão.

A grande diferença em relação aos processos de moldagem por sopro, injeção ou extrusão, é que o polímero não aquecido até seu ponto de fusão, mas até uma temperatura ligeiramente inferior a ele. A moldagem do material é feita pressionando a chapa contra o molde, isso pode ser feito por moldagem a vácuo ou com o auxílio de um plugue que empurra chapa contra o molde.

No primeiro processo o polímero é posicionado sobre o molde e abaixo de uma placa aquecedora. É importante controlar o aquecimento para que o polímero não falhe sob seu próprio peso. Em seguida as bordas da chapa são lacradas e o ar entre esta e o molde é sugado, fazendo com que o polímero adira ao molde.

O início do processo de termoformagem com plugue é semelhante ao à vácuo, posicionando a chapa de polímero sobre o molde e submetida a calor. Então, após as bordas da placa serem prendidas, um plugue feito com material de baixa condutividade térmica empurra a polímero contra o molde enquanto o ar entre o molde e a chapa é exaurido. Esse método é mais utilizado quando se tem moldes mais profundos.

É um tipo de processamento cujo molde pode ser fabricado com materiais de baixo custo, pois este não é submetido a pressões maiores do que a pressão atmosférica. Dessa forma, essa técnica pode ser aplicada em produtos produzidos em pequena escala e para pequenos nichos, o que seria proibitivo com outras formas de fabricação

Na termoformagem, é possível a fabricação de peças feitas de PC (policarbonato), PMMA (polimetil metacrilato), PA (poliamida), ABS (Acrlonitrila butadieno estireno) assim como compósitos reforçados por fibras. Na indústria automotiva, pode ser encontrado na fabricação de capôs, painéis interiores, pára-choques e pára-lamas (PEACOCK e CALHOUN, 2006).

2.7.7 Calandragem

A calandragem é um processo pelo qual o polímero é espremido por uma sequência de rolos co-rotativos, sendo transformado em chapas e filmes de modo contínuo. A passagem pelos rolos é precedida pela passagem dos polímeros em um misturador, que mistura e homogeneiza os polímeros e aditivos a serem processados e uma extrusora, que alimenta os rolos com o material (SEHANOBISH, 2009).

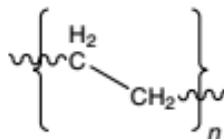
O primeiro par de rolos controla a taxa de processamento do polímero. Na maioria de equipamentos de calandragem, são utilizados quatro rolos. A chapa de polímero pode posteriormente passar por um segundo grupo de rolos para adquirir textura. Produz chapas com relativa precisão dimensional, mas apresenta o inconveniente de os rolos envergarem com o uso, o que pode ser compensado com o seu posicionamento não exatamente paralelos (SEHANOBISH, 2009).

2.8 SUBSTÂNCIAS POLIMÉRICAS MAIS UTILIZADAS

2.8.1 Polietileno

A estrutura geral do polietileno é ilustrada na figura abaixo:

Figura 1: estrutura geral do polietileno



Fonte: Polymer Chemistry: Properties and Applications (PEACOCK e CALHOUN, 2006)

Modificações na molécula são feitas adicionando ramificações, introduzindo ligações cruzadas entre as moléculas ou trocando os grupos terminais. Essas variações fazem com o polietileno seja utilizado para uma grande variedade de finalidades.

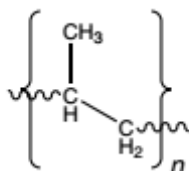
Uma de suas variações é o Polietileno de Alta Densidade (HDPE), cujas cadeias apresentam muito poucas ramificações. Já o Polietileno de Baixa Densidade (LDPE), apresenta muitas ramificações longas e curtas. Os Polietilenos de Lineares de Baixa Densidade (LLDPE) apresentam outros monômeros inseridos na cadeia principal numa fração de 2 a 8% e os Polietilenos de Muito Baixa Densidade (VLDPE), de 8 a 14%. O copolímero de Etileno-Vinil Ester (EVA) apresenta até 25% de concentração de co-monômero Vinil com ramificações de éster. Por fim, temos os Polietilenos com ligações cruzadas, que possuem ligações permanentes entre cadeias adjacentes e os Ionômeros de Etileno, que são copolímeros com algum ácido orgânico.

É muito utilizado na forma de filmes, produto de moldagem a sopro, para embalagem de alimentos, sacos plásticos, coberturas de estufas e balões atmosféricos, fazendo valer de sua resistência e impermeabilidade. Sendo extrudado, esse polímero pode ser usado para tubos flexíveis ou rígidos para transporte de água ou gases. Já na moldagem a sopro, é utilizado na fabricação de garrafas e recipientes, enquanto na moldagem por injeção pode ser utilizado na fabricação de brinquedos (PEACOCK e CALHOUN, 2006). É também bastante empregado na fabricação de tanques de combustível devido a redução de peso e a moldagem em formas mais complexas, mas apresenta alguns inconvenientes, como a degradação mecânica devido à interação com biocombustíveis. Essa interação tem sido estudada para a determinação dos mecanismos de degradação, como a absorção de combustível (THOMPSON, MU, *et al.*, 2013) e a atividade metabólica de micro-organismos (RICHAUD, DJOUANI, *et al.*, 2015) e a previsão da vida do tanque em contato com o etanol (RESTREPO-FLÓREZ, BASSI, *et al.*, 2014).

2.8.2 Polipropileno

Corresponde aproximadamente a 30% dos polímeros produzidos no mundo, possuindo a seguinte estrutura.

Figura 2: Estrutura básica do Polipropileno



Fonte: Polymer Chemistry: Properties and Applications (PEACOCK e CALHOUN, 2006)

Apresenta alta resistência, rigidez e alto ponto de fusão, comparado a outros polímeros de baixo-custo. A organização dos grupos metil, ligado a um dos carbonos da cadeia principal, desempenha um papel importante nas propriedades das diferentes variações de polipropileno: polipropileno isotático, atático e sindiotático. A primeira variação se dá quando os grupos metil se encontram do mesmo lado da cadeia principal e pode ser conseguida em até 95% da substância total. Na variação atática os grupos metil não têm padrão de organização. Já na última forma, sindiotática, os grupos metil se encontram alternados na cadeia principal. Essa variação não pode ser conseguida tão facilmente e raramente excede 75% do total de cadeias de polietileno na substância.

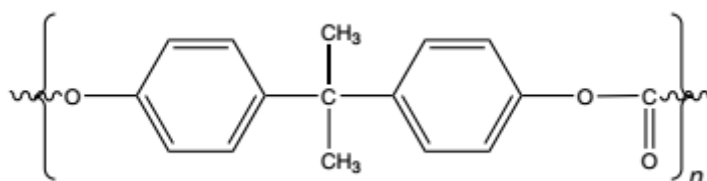
O polipropileno pode ser encontrado em fibras, filmes e quando moldado por injeção, pode ter como finalidade brinquedos, carcaças de eletrônicos, móveis de plástico e louça resistente à lava-louças (PEACOCK e CALHOUN, 2006). No setor automotivo, é utilizado em para-choques, spoilers, guarnições exteriores e caixas de bateria (BIRON, 2013). É também encontrado em painéis de instrumentos fabricados pela empresa Magneti Marelli (DEGOLU, ZANCHI, *et al.*, 2016). O primeiro compósito de fibra natural produzido em larga escala foi uma matriz de polipropileno reforçada com fibras de abacá, utilizada no Mercedes-Benz Classe-A (KORONIS, SILVA e FONTUL, 2013). O polipropileno apresenta algumas desvantagens, como o seu caráter hidrofóbico, dificultando a sua pintura ou qualquer revestimento, no entanto, devido a tratamentos de superfície como o de plasma, é utilizado em pára-choques, podendo ser pintado e revestido (WEON e CHOI, 2009). O polipropileno expandido, uma espuma polimérica, é amplamente utilizado na indústria. Foi desenvolvido nos anos 70 para a indústria automotiva, produzindo peças mais leves com as propriedades mecânicas desejáveis. É mais utilizado em componentes internos, como painéis de porta, pilares e encostos de cabeça. Schwarz et al fazem um resumo das técnicas utilizadas até então para a análise em elementos finitos do polipropileno expandido e sugerem passos a serem adotados para o aumento da precisão dos resultados (SCHWARZ, RUNCIANU e GEBHARDT, 2017). Sua alta capacidade

de processabilidade e compressibilidade faz com que esteja presente na parte interna de pára-choques como absorvedor de impacto, diminuindo os danos eventualmente causados em pedestres (GIL, KWON, *et al.*, 2016).

2.8.3 Policarbonatos

Possui características muito desejáveis, como alta estabilidade térmica, dureza e fratura dúctil ao invés de frágil, colocando esse tipo de polímero entre os considerados polímeros de engenharia. Além disso, pode ser facilmente processado em equipamentos padrões de injeção, sopro ou extrusão. Sua estrutura geral é ilustrada abaixo:

Figura 3: estrutura básica do policarbonato



Fonte: Polymer Chemistry: Properties and Applications (PEACOCK e CALHOUN, 2006)

A sua ductilidade aumenta consideravelmente a resistência ao impacto do material, mas ainda não há consenso sobre o mecanismo químico que confere essa característica ao material. Sua alta resistência a temperatura é devida à sua temperatura de transição vítrea, entre 141° e 150 C. Além das características já mencionadas, os policarbonatos apresentam boa característica de transparência. Essa característica é devida a sua estrutura quase completamente amorfa, sem interface entre regiões semicristalinas e amorfas que possam desviar a luz.

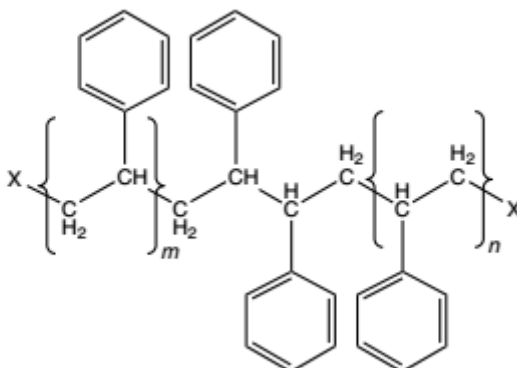
Quando processado por moldagem a injeção, produz CDs, janelas de aeronaves, caixas de jóias e devido a sua resistência à impacto pode também ser utilizado para a confecção de capacetes de proteção (PEACOCK e CALHOUN, 2006). Também pelo processo de moldagem por injeção, as lentes dos faróis dos veículos são produzidas de policarbonato. O polímero apresenta vantagens sobre o vidro, tradicionalmente usado nos faróis, como resistência e menor peso, além de possuir excelente transparência. A única desvantagem é sua degradação quando expostos às intempéries do ambiente externo, sendo necessário um revestimento em sua parte externa e interna para ser usado como faróis e lanternas (MACÍAS, MEZA e PÉREZ, 2015). Além das lanternas e faróis, o policarbonato teve sua utilização no setor automotivo alavancada pelo uso de glazing em tetos e para-brisas (BEWLEY, 2012).

2.8.4 Poliestireno

Consistem em uma cadeia principal de carbonos, e em metade desses estão atracados grupos fenil. São rígidos, transparentes, razoavelmente resistentes, quimicamente inertes e fraturam de

forma frágil. Pode ser facilmente processado por injeção, sopro, extrusão ou termoformagem. Em sua forma esponjosa, é um excelente isolante térmico. Sua estrutura é ilustrada na Figura 4:

Figura 4: estrutura geral do poliestireno



Fonte: Polymer Chemistry: Properties and Applications (PEACOCK e CALHOUN, 2006)

Pode ser fundido sem a necessidade de muita adição de energia. Na sua forma homopoliestireno, sua rigidez, transparência e baixo custo o torna adequado a várias finalidades. Sendo moldado por injeção, pode ser convertido em talheres descartáveis, brinquedos e alguns dispositivos médicos. Placas extrudadas podem ser posteriormente termoformadas para a fabricação de copos descartáveis e embalagens de iogurte.

A borracha de poliestireno endurecida, é utilizada como carcaça de celulares, pois sua boa combinação entre rigidez e resistência ao impacto é desejável em um produto que frequentemente sofre algum tipo de queda (PEACOCK e CALHOUN, 2006).

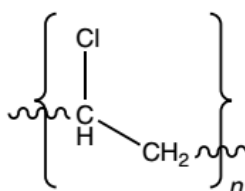
Um dos poliestirenos mais utilizados na indústria é o Acrinitrila-butadieno-estireno (ABS). O ABS é um polímero de duas fases, com uma matriz que é formada pelo copolímero de estireno e acrilonitrila e uma fase dispersa de butadieno. Sua utilização teve início na segunda guerra mundial, e foi usado para produzir placas de plástico a prova de balas devido à sua alta resistência ao impacto. Seu uso tem crescido rapidamente nos últimos anos, passando de 3850 mil toneladas em 1995 para 6600 toneladas em 2005 (Ulmann's Polymers and Plastics: Products and Processes, 2016). Na indústria automotiva, pode ser encontrado misturado a policarbonato em painel de instrumentos, calotas e porta-luvas (NISHINO, SHINDO, *et al.*, 2017).

A sua forma esponjosa é processada por extrusão, termoformagem ou expandido já dentro da cavidade do molde. Nesse estado, o poliestireno costuma ter a finalidade de isolamento, sendo utilizado em construções e tubos.

2.8.5 Cloreto de Poli-vinil

Mais conhecido como PVC, o cloreto de Poli-vinil é o polímero mais versátil e difundido que se pode encontrar. Sua versatilidade faz com ele seja convertido em bolsas de sangue, brinquedos, papéis de parede, cortinas de chuveiro e calçados. No entanto, sua impopularidade se deve ao fato de sua combustão ter como produto substâncias tóxicas, e porque sua fabricação é muito meticulosa, pois qualquer instabilidade pode causar danos ao equipamento e ao pessoal. Sua estrutura é mostrada na Figura 5:

Figura 5: Estrutura básica do cloreto de polivinil



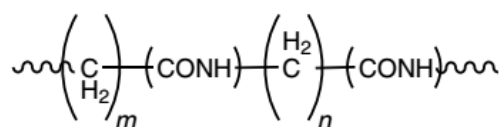
Fonte: Polymer Chemistry: Properties and Applications (PEACOCK e CALHOUN, 2006)

Também pode ser processado por grande quantidade de métodos, como extrusão, molde por injeção, por sopro ou por rotação (PEACOCK e CALHOUN, 2006). Em veículos automotivos podem ser encontrados em guarnições interiores e exteriores, entre outras funções (BIRON, 2013). Pode ser encontrado com acabamento superficial Classe A, como os extrudados utilizados no Dodge Challenger e produzidos pela empresa Teknor Apex (PVC compounds for automotive exterior Class-A trim, 2015).

2.8.6 Nylon

A sua estrutura química consiste em grupos metileno alternados com amidas, como na:

Figura 6: estrutura geral do Nylon



Fonte: Polymer Chemistry: Properties and Applications (PEACOCK e CALHOUN, 2006)

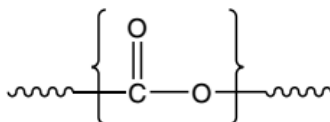
Variações incluem o tamanho da sequência de metilenos ou a orientação dos grupos de amida.

Os Nylons pertencem à categoria de polímeros de engenharia, devido à sua resistência, rigidez e resistência ao calor. É comumente processado em forma de fibras (PEACOCK e CALHOUN, 2006). É usado para a fabricação de engrenagens de sistemas de direção elétrica, presentes nos veículos Golf, Touran e Audi A3 (Electric power steering system has nylon resin worm whell, 2004).

2.8.7 *Poliéster*

Também se encontram na classe de polímeros de engenharia. São sintetizados por condensação entre ácido dicarboxílico e dialcool. A estrutura geral do polímero é mostrada abaixo:

Figura 7: estrutura básica do poliéster



Fonte: Polymer Chemistry: Properties and Applications (PEACOCK e CALHOUN, 2006)

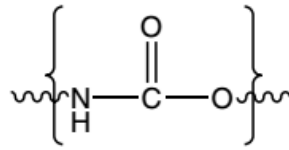
Poliésteres têm ótima resistência à tração, aproximadamente o dobro dos polietilenos de baixa densidade e dos polipropilenos. Sua resistência ao impacto é semelhante à dos poliestirenos, mas não é grande o suficiente para suportar situações de grande impacto, como as necessárias para painéis de carros e por essa razão costuma ser processada com fibras de vidro. Algumas de suas variações apresentam excelente impermeabilidade a gases, o que torna seu uso bem adequado para garrafas de bebidas gaseificadas, como refrigerantes. Além disso possuem grande resistência á colapso no caso de descargas elétricas contínuas, tendo algumas de suas variações convertidas em painéis de eletricidade.

Podem ser transformados pela maioria dos processos de fabricação já mencionados, moldagem por injeção, por sopro e extrusão. Materiais injetados dão origem à bulbos de lâmpadas e painéis de conexões elétricas. Devido à baixa viscosidade do polímero fundido, a peça a ser fabricada por injeção pode conter geometrias mais finas e intrincadas. Já os extrudados podem se converter em filmes isolantes, filmes fotográficos e fibras de tecidos. No caso do processo de moldagem a sopro, o produto mais comum é a garrafa de refrigerante e de óleo de cozinha (PEACOCK e CALHOUN, 2006). No setor automotivo, podem ser encontrados em compósitos de fibra natural. No Mercedes-Benz Travego, um compósito de poliéster e linho é usado para a fabricação do encapsulamento do motor (KORONIS, SILVA e FONTUL, 2013);

2.8.8 *Poliuretano*

A família dos poliuretanos compreende uma grande variedade de substâncias, com propriedades diferentes. São considerados poliuretanos os polímeros que possuem a conexão de uretano mostrada abaixo:

Figura 8: estrutura geral do poliuretano



Fonte 1: Polymer Chemistry: Properties and Applications (PEACOCK e CALHOUN, 2006)

Os polímeros mais comuns dessa família são aqueles em que se encontram poli-éter conectados a poliésteres por ligações de uretano. São sintetizados pela reação de dióis com isocianatos, podendo ser tanto termoplásticos quanto termofixos, dependendo da existência ou não de ligações cruzadas. Caso seja desejado um polímero termoplástico, utiliza-se apenas diisocianatos, caso se queira um polímero termofixo, usa-se uma mistura de tri e poliisocianatos. O poliuretano, diferentemente dos outros polímeros, costuma ser sintetizado diretamente na cavidade onde será moldado.

Um dos produtos mais comuns de poliuretano é a espuma, podendo ser encontrada nas categorias flexível, semi-rígida ou rígida. A categoria flexível é utilizada principalmente para estofamento, na forma semi-rígida, é encontrada principalmente em solas de sapatos, já a forma rígida, costuma ser sintetizada no local onde ocorrerá seu uso final e é encontrada com a finalidade de isolamento no interior de paredes (PEACOCK e CALHOUN, 2006). Pode ser encontrado em compósitos de fibra natural, como nas guarnições de porta do Audi A2, feitas de poliuretano com uma mistura de fibras de sisal e linho (KORONIS, SILVA e FONTUL, 2013).

O processo de injeção também pode ser utilizado sem que se deseje produção de espuma. Nesse caso, o produto final é geralmente um elastômero com ligações cruzadas, amplamente utilizado para a produção de pneus sólidos, encontrados em carrinhos de supermercado e em empilhadeiras.

Também são encontrados em forma de fibras elásticas, utilizados em tecidos para redução de flacidez e em forma de borrachas (PEACOCK e CALHOUN, 2006).

2.9 MATERIAIS COMPÓSITOS

Os materiais compósitos constituem de duas ou mais fases, e embora formem um único material, seus constituintes ainda são identificáveis e separáveis. Combinando dois ou mais materiais, o compósito resultante tira proveito das propriedades de todas as fases, tendo um conjunto de características que não podem ser obtidas de um único componente isolado. Estão cada vez mais presentes no dia-a-dia devido as boas características do material em relação a redução de peso, resistência a corrosão, alta resistência a fadiga e montagem mais veloz, sendo extensivamente empregados em aeronaves e construção civil (DANIEL e ISHAI, 1994).

Geralmente são constituídos por uma matriz contínua impregnada com material de reforço. Tanto para a matriz quanto para o reforço estão disponíveis uma grande quantidade de materiais, permitindo combinações variadas destes, com diversas propriedades. Quando a matriz é constituída por algum polímero, o material é classificado como compósito polimérico, sendo utilizados principalmente na substituição de metais e consequente redução de peso. São constituídas, geralmente, por alguma das substâncias descritas na seção anterior (THOMAS, JOSEPH, *et al.*, 2012).

As matrizes são normalmente a parte mais fraca do compósito e mais dúctil. A matriz polimérica tem uma série de funções em relação ao conjunto do material, como: manter o reforço posicionado, manter a forma e a estrutura da parte, proteger o reforço contra abrasão, impacto e transferir carga para este (GOODSHIP, MIDDLETON e CHERRINGTON, 2016).

Já a parte de reforço do compósito pode vir em forma de partículas, placas ou fibras, mas nos compósitos poliméricos são encontrados majoritariamente reforços fibrosos. As fibras podem ser classificadas como curtas, longas ou contínuas. Fibras curtas possuem a relação comprimento\diâmetro menor que 100 e oferecem melhorias limitadas às propriedades das matrizes poliméricas. As fibras longas, obviamente, têm relação comprimento\diâmetro maiores que 100 e são descontínuas. Já a as fibras contínuas percorrem todo o material sem descontinuidade (THOMAS, JOSEPH, *et al.*, 2012). Uma das características mais importantes na determinação das características do material composto é a fração em peso entre fibra e matriz. Já a distribuição do reforço determina a homogeneidade das propriedades, sendo que sua melhor distribuição ocasiona em menor probabilidade de falhas em áreas fracas. A orientação das fibras também afeta o grau de anisotropia do material (DANIEL e ISHAI, 1994).

Existem também os materiais compósitos definidos como estruturas sanduíches. São atraentes pela sua alta resistência e alta rigidez em relação à flexão. No geral, os compósitos sanduíche são compostos por duas chapas delgadas de material muito rígido unidas às duas faces de um material menos denso que corresponde ao núcleo do compósito. Existem variações desse tipo de estrutura, mas no geral mantêm o esquema de núcleos leves, que reduzem o peso do material como um todo, e cascas rígidas. Apesar das características desejáveis, esse tipo de estrutura ainda não é considerado como escolha, no curto prazo, na indústria automotiva comercial, sendo restrito à carros de alta performance e tecnologia (NJUGUMA, 2016).

2.10 FIBRAS MAIS UTILIZADAS EM COMPOSTOS POLIMÉRICOS

2.10.1 *Fibra de vidro*

É o tipo de fibra mais utilizada em compósitos poliméricos, tendo qualidades desejáveis devido a sua resistência específica e rigidez, além de ser um material de baixo custo. São

fabricados a partir do material fundido e uma vez na forma de fibras, recebem um revestimento que auxilia na sua aderência à matriz (GOODSHIP, MIDDLETON e CHERRINGTON, 2016). Esse revestimento é aplicado devido a adesão precária que a fibra de vidro apresenta em relação à matriz. Além disso a fibra de vidro possui as desvantagens de ser pouco resistentes à abrasão e absorvem umidade. Os tipos mais comuns de fibras de vidro são A-glass, E-glass, C-glass ,S-glass e D-Glass (KAR, 2017).

O tipo E-glass é o mais utilizado e apesar da boa rigidez e resistência, apresenta baixa resistência ao impacto. Sua característica principal é a resistência à eletricidade. O tipo A-glass é altamente resistente a agentes químicos, mas baixas propriedades elétricas (KAR, 2017). As fibras C-glass apresentam resistência química ainda maior do que as A-glass e são usadas em tanques e canos. A fibra S-glass possui características mecânicas e térmicas melhoradas em relação às outras (GOODSHIP, MIDDLETON e CHERRINGTON, 2016). As fibras D-glass possuem propriedades elétricas superiores com baixa constante dielétrica (KAR, 2017).

2.10.2 *Fibra de carbono*

Comparada aos outros tipos de reforço, a fibra de carbono é a mais cara, mas apresenta as melhores propriedades específicas. Também são revestidas para proteção das fibras e melhor adesão à matriz. As fibras de carbono possuem algumas variantes, como a fibra de alta resistência (HS), que é a fibra padrão, fibra de módulo intermediário (IM), de alto módulo de elasticidade (HM) e de módulo ultra alto (UHM). Possuem alta resistência à tração e módulo de elasticidade, mas a resistência ao impacto das fibras de carbono é baixa. É fabricada pelo aquecimento, oxidação, carbonização de fibras de poliácrlonitrila (KAR, 2017). Devido ao seu alto custo, são mais utilizadas no setor aeroespacial e automotivo de alta tecnologia (PEACOCK e CALHOUN, 2006). Devido ao seu alto custo, as fibras de carbono são usadas no setor automotivo majoritariamente em carros de corrida e carros de luxo. O primeiro chassi de Fórmula 1 feito em fibra de carbono foi o McLaren campeão do Gran Prix de 1980. Lamborghini e Aston Martin também usam compósitos em fibra de carbono na estrutura de seus veículos (MORGAN, 2005).

2.10.3 *Aramida*

É uma fibra polimérica, possuindo menos densidade e maior resistência específica comparada aos outros tipos. Possui ótimas qualidades de resistência à tração e ao impacto, motivos pelos quais a aramida é frequentemente encontrada em coletes a prova de balas e cordas de escalada (GOODSHIP, MIDDLETON e CHERRINGTON, 2016). A sua desvantagem é que a automatização dos processos envolvendo fibra de aramida é difícil (KAR, 2017). É conhecida pelo nome comercial Kevlar.

2.10.4 *Fibras de Basalto*

É fabricado por meio de um material fundido de 100% de basalto, sem outros constituintes ou aditivos, motivo pelo qual é considerado mais ecológico do que a fibra de carbono. Possui maior resistência e rigidez do que a fibra de vidro e não é tão caro quanto a fibra de carbono. É mais utilizado para aplicações de construção civil e apesar de seu uso não ser tão difundido quanto o de fibra de vidro e de carbono, tem potencial para muitas outras aplicações em conjunto com outros materiais. (PEACOCK e CALHOUN, 2006).

2.10.5 *Fibras de Boro*

São fabricadas pela deposição química a vapor no qual um filamento muito fino de tungstênio é o núcleo e tri-cloreto de boro é a fonte de boro que revestirá o filamento (KAR, 2017). São muito caras e por isso têm seu uso restrito a aplicações especiais, como algumas partes submetidas a altas temperaturas no setor aeroespacial.

2.10.6 *Fibras Naturais*

São fibras de baixo custo normalmente derivadas de plantas (GOODSHIP, MIDDLETON e CHERRINGTON, 2016). Comparadas às fibras de vidro e de carbono, as mais usadas, possuem densidade mais baixa, provoca menos desgaste ao ferramental durante o processamento, não causa danos à saúde, biodegrada, é proveniente de fontes renováveis e tem menor custo por unidade de volume. As desvantagens das fibras naturais é que possuem menor resistência e rigidez específica, possuem menor adesão à resina e maior tendência de absorver umidade. Exemplos de fibras naturais são: sisal, linho, cana-de-açúcar e cânhamo (CAMPILHO, 2016).

2.11 PROCESSAMENTO DE COMPÓSITOS POLIMÉRICOS

2.11.1 *Laminação manual*

É o processo mais básico e mais barato quando consideramos o equipamento utilizado. A qualidade das peças depende da habilidade do operador, o que quer dizer que a mão de obra tem que ser qualificada. O reforço é normalmente algum tecido de fibra de um dos materiais citados anteriormente. Esse tecido é aplicado a um molde de apenas um lado, geralmente a parte fêmea, cuidadosamente adaptado aos contornos da cavidade, para que então o operador faça a impregnação da resina, às vezes com a ajuda de rolos. Nesse processo, é difícil obter um grande volume de peças produzidas, pois o longo tempo de cura e processamento manual diminuem sua celeridade (GOODSHIP, MIDDLETON e CHERRINGTON, 2016). Outro aspecto negativo é que como o ar preso na resina é retirado manualmente, é difícil obter níveis baixos de

porosidade. Além disso, a produção da peça em ambientes agressivos pode levar à degradação de suas propriedades mecânicas devido à sua exposição. Um exemplo dessa degradação é a corrosão das fibras de vidros em matriz de poliéster quando expostas a NaOH (BELLOUL, HAMADACHE, *et al.*, 2015). As matrizes mais utilizadas são as epóxi e poliéster, por curarem em temperatura ambiente. Para manter uma superfície de alta qualidade, geralmente se usa uma camada de gel pigmentado no molde (KAR, 2017).

2.11.2 Laminação a Spray

Assim como no processo de laminação manual, a laminação a spray é aplicada à um molde de apenas um lado, tornando o processo mais barato. Além disso, cura a temperatura ambiente, levando tempo demais para a produção em massa. Diferentemente da laminação manual, uma arma de ar comprimido lança na cavidade do molde uma mistura de resina com fibra picada, ou seja, o pré-posicionamento de um tecido de fibra não ocorre. Apesar do longo tempo de cura, o processo de deposição da mistura de fibra com resina leva menos tempo do que o de impregnação manual, no entanto o fato de a fibra estar picada confere ao material resultante propriedades mecânicas limitadas (GOODSHIP, MIDDLETON e CHERRINGTON, 2016).

2.11.3 Laminação a Vácuo

É um processo de cura no qual o material obtido possui baixa porosidade, permitindo maior volume de fibra. Após a fibra ser impregnada pela resina de modo manual, a peça em processamento é inserida em um saco, que é lacrado. Uma bomba de vácuo tira o ar de dentro desse saco, o que faz com que a pressão exercida pela atmosfera aja sobre a resina e a faça impregnar melhor nas fibras. Nesse processo, a cura da resina é mais rápida e pode ser realizado colocando o saco lacrado em um forno, acelerando ainda mais o processo.

Embora as peças produzidas nesse processo tenham melhores propriedades mecânicas e seja um processo mais rápido do que os vistos até então, é mais oneroso devido à aquisição dos sacos e dos materiais para lacrá-lo, assim como a necessidade de uma bomba a vácuo. Além disso, o tamanho das peças fica limitado aos sacos utilizados. No caso de o processo ser realizado em forno, haverá gastos adicionais (GOODSHIP, MIDDLETON e CHERRINGTON, 2016).

Essa técnica pode ser utilizada hibridamente com a laminação manual, onde camadas exteriores de fibra e resina são primeiramente aplicadas ao molde de forma manual e curadas, em seguida camadas internas são aplicadas sobre as primeiras e curadas a vácuo. Esse processo híbrido tem a vantagem de produzir peças com melhores propriedades mecânicas do que a laminação manual e custo menor do que somente na laminação a vácuo (KIM, SHIM, *et al.*, 2014).

2.11.4 Moldagem por injeção reativa (RIM)

Nesse processo, monômeros e oligômeros de baixa viscosidade são misturados a alta pressão e injetados na cavidade do molde, onde o processo de polimerização ocorre, grandes partes podem ser retiradas do molde em 1 ou 2 minutos (LUO, WANG e YING, 1997). A diferença entre RIM e a moldagem por injeção é o fato de ser utilizado um polímero termofixo. Em relação aos materiais compósitos, quando fibras picadas são incorporadas na mistura de reagentes e injetadas no molde junto à mistura, o processo recebe o nome de Moldagem por Injeção Reativa Reforçada (RRIM) e quando um tecido pré-formado é inserido no molde antes de os reagentes serem injetados, o processo é chamado de Moldagem por Injeção Reativa Reforçada (SRIM) (GOODSHIP, MIDDLETON e CHERRINGTON, 2016).

2.11.5 Moldagem por transferência de resina (RTM)

É apontado como o meio mais apropriado de se produzir em massa de peças de pequeno e médio porte em materiais compósitos e com geometrias complexas (NJUGUMA, 2016). Nesse processo, assim como na moldagem por infusão e na laminação manual, um tecido é posicionado sobre a parte fêmea de um molde, mas ao contrário deles, a parte macho do molde é encaixada sobre o tecido e lacrada, o que pode ser precedido pela aplicação de um agente que auxilia na extração da peça, ou um revestimento em gel que confere maior acabamento superficial. Assim, resina é injetada a alta pressão no molde aquecido, de 2 a 20 bar. Depois de curada a resina, a peça é então extraída do molde (GOODSHIP, MIDDLETON e CHERRINGTON, 2016). A diferença do processo RTM para RIM é que no RTM a cura se dá pela ativação térmica no molde enquanto no RIM a cura acontece pela mistura dos reagentes. Além disso a cura no RTM é bem mais lenta (THOMAS, 2013).

No RTM, podem ser fabricadas peças mais complexas, com alto teor de fibras, com superfícies bem definidas em ambos os lados da peça, mas é mais custoso devido à necessidade de outra parte do molde. Algumas variantes desse processo são utilizadas, como o auxílio de uma bomba a vácuo, que aumenta o gradiente de pressão (GOODSHIP, MIDDLETON e CHERRINGTON, 2016).

É um processo utilizado pela BMW para produzir tetos reforçados com fibra de carbono M3 e M6. É também utilizado na fabricação de componentes para a Mercedes SLR (NJUGUMA, 2016). Devido à queda na velocidade da resina a medida que esta flui pelo molde, algumas pesquisas são realizadas no intuito de melhorar sua infusão pelo tecido e viabilizar a produção em massa de peças grandes. A empresa japonesa Toray Industries relata desenvolvimentos no processo RTM que reduziriam o ciclo de moldagem de 160 para 10 minutos (STEWART, 2009). Outra pesquisa promete a redução do tempo na produção mudando

o sentido da infusão da resina. Ao invés dessa fluir pelo plano da peça, fluiria pela sua espessura com o auxílio de múltiplas portas de vácuo (HAN, CHO, *et al.*, 2014).

2.11.6 Moldagem por infusão de resina

Diferentemente dos processos de RTM e RIM. A moldagem por infusão utiliza apenas uma parte de um molde rígido, onde o tecido de fibras é posicionado. Onde seria posicionado a segunda parte do molde rígido é colocada um filme flexível. Duas portas são incluídas nesse filme, uma para a entrada de resina e outra onde é conectada uma bomba de vácuo. A resina nesse processo deve ser de baixa viscosidade (GOODSHIP, MIDDLETON e CHERRINGTON, 2016). Pesquisas mostram que o pré-aquecimento do molde e das fibras reduzem a viscosidade da resina e não afeta as propriedades do compósito, fazendo com que a resina flua mais rápido e haja menos vazios no material (NJUGUMA, 2016).

Algumas pesquisas procuram demonstrar o uso desta técnica na produção de grandes partes de veículos, procurando demonstrar o benefício de seu uso na fabricação da estrutura de um veículo em um só passo de infusão de resina, produzindo uma peça que atenda aos requisitos mecânicos, de impacto, baixo custo e aerodinâmicos. O resultado foi um veículo com desempenho notável na maratona Euro Eco, que aconteceu na Malásia (KHAN, MAHMOOD, *et al.*, 2014).

Testes de laboratório apontam a sensível melhora das propriedades da matriz no caso da inserção de nano partículas grafeno e nano tubos de carbono, no entanto a adoção em níveis industriais tem como um dos empecilhos o efeito de filtragem em processos como o de moldagem por infusão e transferência de resina. Essa filtragem acontece devido a retenção de partículas pelas fibras, aumentando sua concentração próximo à entrada de resina no molde (ZHANG, LIU, *et al.*, 2016).

2.11.7 Molde por compressão

Nesse processo, uma folha de material composto, fibra e resina, ou uma massa desse material, é posicionado dentro do molde aquecido, que se fecha e devido a sua pressão e temperatura, cura o material. Quando se coloca uma massa desse material no molde, chamada BMC (bulk moulding compounds), essa normalmente é feita de fibras picadas e resinas, o oferece propriedades mecânicas limitadas ao material. Já quando se usa uma folha SMC (sheet moulding compound), a peça resultante tem melhorias significativas devido à possibilidade de orientação das fibras desta (PEACOCK e CALHOUN, 2006). No caso de termoplásticos reforçados, usa-se, de forma semelhante a SMC, uma chapa denominada GMT (glass-mat reinforced thermoplastics).

Algumas partes fabricadas utilizando SMC podem substituir painéis metálicos dos automóveis, com a vantagem de serem mais leves e resistente a corrosão (PEACOCK e CALHOUN, 2006). Adicionalmente, a moldagem por compressão de SMC pode apresentar menos problemas de homogeneidade e dispersão de nano-materiais na matriz. A dispersão de nano-cristais de celulose, por exemplo, pode dispensar o uso de parte da fibra de vidro e reduzir o peso do compósito em até 7.5% (ASADI, MILLER, *et al.*, 2016).

2.11.8 Autoclave

É o tipo de processamento de compósitos mais caro devido ao alto custo do forno utilizado e dos tipos de prepreg empregados. Basicamente, o material é posicionado e colocado dentro de um saco, onde será realizado vácuo. Esse saco é colocado em um forno, denominado autoclave, que cura o material a altas temperaturas, de 120 a 180 graus celsius e alta pressão, de 5 a 6 atmosferas.

Esse processo produz materiais compósitos com as melhores propriedades mecânicas, com alto volume de fibras e baixa porosidade, porém, devido ao seu custo, é utilizado apenas em aplicações especiais como na Formula 1 e estruturas de aeronaves (GOODSHIP, MIDDLETON e CHERRINGTON, 2016). Além do custo, o processo de autoclave, segundo pesquisas, apresenta desvantagem em relação à manutenção da pintura. A pintura de um compósito de fibra de carbono sofreria um processo de envelhecimento mais rápido, pois a superfície da peça produzida em autoclave é mais lisa e, devido à falta de aderência, a pintura degrada mais rápido sob ambientes de alta humidade e características cíclicas, como normalmente acontece em automóveis (SOUZA, MARDEL e FOX, 2013).

2.11.9 Moldagem por injeção

A moldagem por injeção de compósitos poliméricos é muito semelhante a de polímeros, porém, a rosca injeta uma mistura de fibras curtas com polímero fundido. Nesse processo, compósitos podem ser produzidos com formas muito mais complexas. Como é utilizado reforço de fibras curtas, as propriedades mecânicas dos produtos têm melhoria limitada.

Na moldagem por injeção, as fibras injetadas junto com o termoplástico tomam certa orientação devido ao escoamento do polímero fundido. Esforços têm sido feitos no intuito de caracterizar essa orientação e simulá-la para que as propriedades do produto final sejam bem conhecidas. O raio-X conjugado com técnicas de processamento de imagem pode ser uma técnica promissora para a determinação da orientação e o teor de fibra em um compósito de forma não destrutiva (PRADE, SCHAFF, *et al.*, 2017) Outras técnicas experimentais para validar simulações são utilizadas, como espectroscopia terahertz no domínio do tempo,

microtomografia computadorizada e análise de cortes em micrótomo, sendo que a primeira tem a vantagem de ser uma técnica mais ágil, enquanto a segunda apresenta mais correlação com as simulações. (ALBRECHT, BAUR, *et al.*, 2017)

Devido ao alto custo do maquinário encontrado na moldagem por injeção, o processo fica limitado à produções de altos volumes e de partes não estruturais (PEACOCK e CALHOUN, 2006).

2.11.10 Long Fiber Injection (LFI)

Tradicionalmente, compósitos de poliuretano reforçado por fibras de vidro eram produzidos por RIM. Esse processo, no entanto, tem algumas desvantagens como o número excessivo de etapas, manuseio de fibras de vidro, desperdício de material e muito tempo necessário em todo o processo. Impulsionada por essas questões, a empresa Krauss-Maffei desenvolveu o processo de injeção de fibras longas (LFI) em 1995.

O processo consiste em misturar fibras picadas de até 100mm com poliuretano durante o seu derramamento na cavidade do molde por uma cabeça robótica. Tudo em uma só operação.

Os reagentes poliméricos são misturados a alta pressão em uma câmara. Em seguida são transferidos para um tubo anular, que possui um cano no seu centro. A mistura de reagentes é descarregada em volta deste cano pela cabeça robótica. Ao mesmo tempo, a fibra de vidro é desenrolada e picada ao passar por dois rolos, um com lâminas e outro flexível, e depois é descarregada pelo tubo que passa pelo meio da mistura de reagentes, misturando-se a eles com a ajuda de um jato de ar.

No sistema LFI, a mistura completa dos reagentes com a fibra é uma característica fundamental para a qualidade da peça. Para isso, um sistema de limpeza foi desenvolvido especialmente para o LFI, eliminando qualquer traço de resíduo que poderia atrapalhar o fluxo de reagentes e das fibras, piorando a qualidade da mistura.

Nesse sistema, a taxa de fibra introduzida no polímero é controlada pelos rolos citados anteriormente. Nesse sistema, é possível que diferentes áreas do molde tenham diferentes concentrações de fibra, controlando a velocidade do rolo que pica as fibras. A cabeça robótica permite que toda a área do molde seja coberta, inclusive as áreas mais inclinadas, devido a sua capacidade de reorientação (BAUER, 1997). Outra vantagem significativa desse processo é a eliminação da necessidade de pintura, que é um problema em compósitos fabricados em moldagem por compressão que necessitam acabamento classe A, apresentando bolhas na pintura. No processo LFI, um filme termoplástico colorido é previamente inserido no molde, sobre o qual a mistura de fibra de vidro e poliuretano será despejada, eliminando a necessidade

de pintura. Além disso, o material necessário é mais fácil de se obter diretamente de fornecedores primários, no caso fibra de vidro e poliuretano, sem a necessidade de tecidos pré-conformados ou alguma mistura de componentes (MASON, 2006).

2.11.11 Direct Long-Fiber Thermoplastics (D-LFT)

Anteriormente, os termoplásticos de fibra longa (LFT) eram produzidos por moldagem a compressão, com uma chapa polimérica pré-impregnada com fibra de vidro (GMT-glass-mat reinforced thermoplastics). Esse processo tem o inconveniente de demorar tempo demais e de necessitar de um produto semi-acabado, a chapa com fibra de vidro.

Baseado nisso, foi desenvolvido um processo de uma única etapa que não necessita de uma GMT. Esse processo, o D-LFT, consiste em uma extrusora de roscas duplas e alta velocidade de rotação, que funde o polímero e o extruda em forma de filme dentro de uma segunda extrusora. Nessa segunda extrusora, ocorre a alimentação de fibra de vidro. As roscas desta segunda extrusora são projetadas de tal forma a misturar a fibra de vidro ao termoplástico fundido sem a quebra das fibras em tamanhos muito pequenos, evitando a degradação as propriedades do compósito obtido.

Após a mistura de fibra e polímero ser extrudada novamente, uma parte do extrudado com o peso necessário é cortada e imediatamente moldada por compressão. A vantagem desse processo em relação à tradicional moldagem por compressão é que as fibras são misturadas ao polímero fundido, obtendo maior dispersão destas, o que proporciona um compósito com melhores propriedades mecânicas e superfície com maior qualidade (KRAUSE, HENNING, *et al.*, 2003).

2.11.12 Extrusão

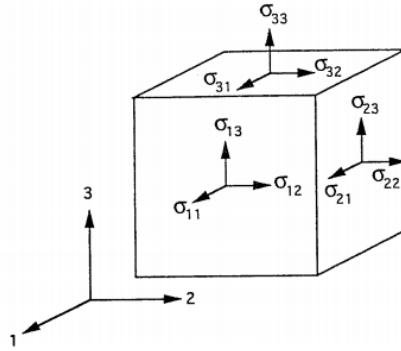
Também é muito semelhante à extrusão de polímeros, com a diferença que o fundido é um termoplástico misturado às fibras de vidro curtas (PEACOCK e CALHOUN, 2006).

2.12 CÁLCULO DAS PROPRIEDADES DE COMPÓSITOS

Cada tipo de compósito tem suas propriedades descritas por um modelo, que se adequa melhor às características daquele compósito.

O estado de tensões de um ponto de uma lâmina de compósito unidirecional de fibras contínuas, de um modo mais geral, pode ser representado por nove componentes de tensões, sendo seis de cisalhamento e 3 de tensões normais, como na Figura 9:

Figura 9: Componentes de tensões



Fonte: Engineering Mechanics of Composite Materials (DANIEL e ISHAI, 1994)

O estado de tensões e deformações para esse ponto é dado pela lei generalizada de Hooke, dada na equação (3):

$$\begin{bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{33} \\ \sigma_{23} \\ \sigma_{31} \\ \sigma_{12} \\ \sigma_{32} \\ \sigma_{13} \\ \sigma_{21} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{1111} & C_{1122} & C_{1133} & C_{1123} & C_{1131} & C_{1112} & C_{1132} & C_{1113} & C_{1121} \\ C_{2211} & C_{2222} & C_{2233} & C_{2223} & C_{2231} & C_{2212} & C_{2232} & C_{2213} & C_{2221} \\ C_{3311} & C_{3322} & C_{3333} & C_{3323} & C_{3331} & C_{3312} & C_{3332} & C_{3313} & C_{3321} \\ C_{2311} & C_{2322} & C_{2333} & C_{2323} & C_{2331} & C_{2312} & C_{2332} & C_{2313} & C_{2321} \\ C_{3111} & C_{3122} & C_{3133} & C_{3123} & C_{3131} & C_{3112} & C_{3132} & C_{3113} & C_{3121} \\ C_{1211} & C_{1222} & C_{1233} & C_{1223} & C_{1231} & C_{1212} & C_{1232} & C_{1213} & C_{1221} \\ C_{3211} & C_{3222} & C_{3233} & C_{3223} & C_{3231} & C_{3212} & C_{3232} & C_{3213} & C_{3221} \\ C_{1311} & C_{1322} & C_{1333} & C_{1323} & C_{1331} & C_{1312} & C_{1332} & C_{1313} & C_{1321} \\ C_{2111} & C_{2122} & C_{2133} & C_{2123} & C_{2131} & C_{2112} & C_{2132} & C_{2113} & C_{2121} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \epsilon_{11} \\ \epsilon_{22} \\ \epsilon_{33} \\ \epsilon_{23} \\ \epsilon_{31} \\ \epsilon_{12} \\ \epsilon_{32} \\ \epsilon_{13} \\ \epsilon_{21} \end{bmatrix} \quad (3)$$

Considerando a simetria dos Essa forma da lei de Hooke contém 81 incógnitas. Pode-se fazer considerações de simetria dos tensores de tensão, assumindo que:

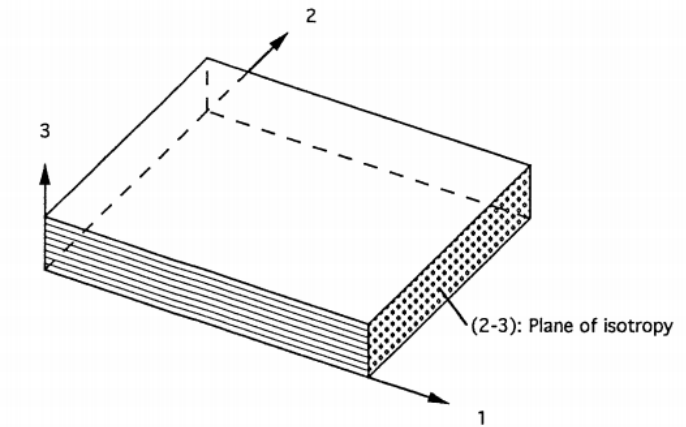
$$\begin{aligned} \sigma_{ij} &= \sigma_{ji} \\ \epsilon_{ij} &= \epsilon_{ji} \end{aligned} \quad (4)$$

Simplificando a notação como em Daniel & Ishai (1994). Temos que a equação (4) pode ser resumida à:

$$\begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \sigma_4 \\ \sigma_5 \\ \sigma_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & C_{14} & C_{15} & C_{16} \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} & C_{24} & C_{25} & C_{26} \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} & C_{34} & C_{35} & C_{36} \\ C_{41} & C_{42} & C_{43} & C_{44} & C_{45} & C_{46} \\ C_{51} & C_{52} & C_{53} & C_{54} & C_{55} & C_{56} \\ C_{61} & C_{62} & C_{63} & C_{64} & C_{65} & C_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \epsilon_1 \\ \epsilon_2 \\ \epsilon_3 \\ \epsilon_4 \\ \epsilon_5 \\ \epsilon_6 \end{bmatrix} \quad (5)$$

Adicionalmente, pode-se fazer considerações de energia e assumir que a lâmina é ortotrópica, como na Figura 10:

Figura 10: esquema de um laminado ortotrópico



Fonte: Engineering Mechanics of Composite Materials (DANIEL e ISHAI, 1994)

Dessa forma. A lei generalizada de Hooke se reduz a equação (6):

$$\begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \sigma_4 \\ \sigma_5 \\ \sigma_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & 0 & 0 & 0 \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} & 0 & 0 & 0 \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \epsilon_1 \\ \epsilon_2 \\ \epsilon_3 \\ \epsilon_4 \\ \epsilon_5 \\ \epsilon_6 \end{bmatrix} \quad (6)$$

Por último, pode-se observar que na maioria das aplicações de engenharia o compósito está submetido ao estado plano de tensões. Nesse caso a equação (6) se resume a seguinte equação:

$$\begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Q_{11} & Q_{12} & 0 \\ Q_{12} & Q_{22} & 0 \\ 0 & 0 & Q_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \epsilon_1 \\ \epsilon_2 \\ \gamma_6 \end{bmatrix} \quad (7)$$

Os parâmetros na matriz de rigidez são traduzidos para as constantes de engenharia da seguinte maneira:

$$Q_{11} = \frac{E_1}{1 - \nu_{12}\nu_{21}} \quad (8)$$

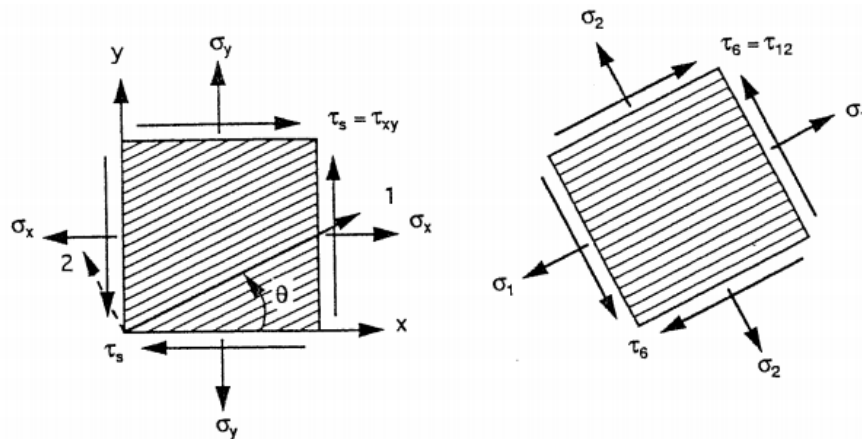
$$Q_{22} = \frac{E_2}{1 - \nu_{12}\nu_{21}} \quad (9)$$

$$Q_{12} = \frac{\nu_{21}E_1}{1 - \nu_{12}\nu_{21}} = \frac{\nu_{12}E_2}{1 - \nu_{12}\nu_{21}} \quad (10)$$

$$Q_{66} = G_{12} \quad (11)$$

Os subscritos dos parâmetros são referentes às direções estabelecidas Figura 10. No caso da rotação da direção das fibras em uma direção x e y qualquer, como na Figura 11, temos as seguintes transformações, de acordo com a notação de Voigt:

Figura 11: rotação do sistema



Fonte: Engineering Mechanics of Composite Materials (DANIEL e ISHAI, 1994)

$$\begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_6 \end{bmatrix} = [T] \begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_s \end{bmatrix} \quad (12)$$

$$\begin{bmatrix} \epsilon_1 \\ \epsilon_2 \\ \frac{1}{2}\gamma_6 \end{bmatrix} = [T] \begin{bmatrix} \epsilon_x \\ \epsilon_y \\ \frac{1}{2}\gamma_s \end{bmatrix} \quad (13)$$

$$\begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Q_{xx} & Q_{xy} & 2Q_{xz} \\ Q_{yx} & Q_{yy} & 2Q_{yz} \\ Q_{zx} & Q_{zy} & 2Q_{zz} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \epsilon_x \\ \epsilon_y \\ \frac{1}{2}\gamma_s \end{bmatrix} \quad (14)$$

$$\begin{bmatrix} Q_{xx} & Q_{xy} & 2Q_{xz} \\ Q_{yx} & Q_{yy} & 2Q_{yz} \\ Q_{zx} & Q_{zy} & 2Q_{zz} \end{bmatrix} = [T^{-1}] \begin{bmatrix} Q_{11} & Q_{12} & 0 \\ Q_{12} & Q_{22} & 0 \\ 0 & 0 & 2Q_{66} \end{bmatrix} [T] \quad (15)$$

$$\begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Q_{11} & Q_{12} & 0 \\ Q_{12} & Q_{22} & 0 \\ 0 & 0 & Q_{66} \end{bmatrix} [T] \begin{bmatrix} \epsilon_x \\ \epsilon_y \\ \frac{1}{2}\gamma_s \end{bmatrix} \quad (16)$$

$$[T] = \begin{bmatrix} m^2 & n^2 & 2mn \\ n^2 & m^2 & -2mn \\ -mn & mn & m^2 - n^2 \end{bmatrix} \quad (17)$$

Na equação (17), m e n significam respectivamente o cosseno e o seno do ângulo θ da Figura 11.

Os parâmetros de engenharia da lâmina utilizados nas equações anteriores podem ser relacionados aos parâmetros de engenharia das fibras e da matriz pela regra das misturas. Na direção longitudinal do compósito, de acordo com a Figura 11, temos:

$$E_1 = V_f E_{1f} + V_m E_m \quad (18)$$

$$\nu_{12} = V_f \nu_{12f} + V_m \nu_m \quad (19)$$

Nas equações (18) e (19) os subscritos m e f referem-se respectivamente à matriz e à fibra.

Já na direção transversal da lâmina, tem-se:

$$E_2 = \frac{E_{2f} E'_m}{V_f E_m + V_m V_{2f}} \quad (20)$$

Onde

$$E'_m = \frac{E_m}{1 - \nu_m^2} \quad (21)$$

A equação (21) tende a subestimar o módulo de elasticidade na direção transversal. A relação semi-empírica de Halpin-Tsai possui melhor concordância com os resultados experimentais:

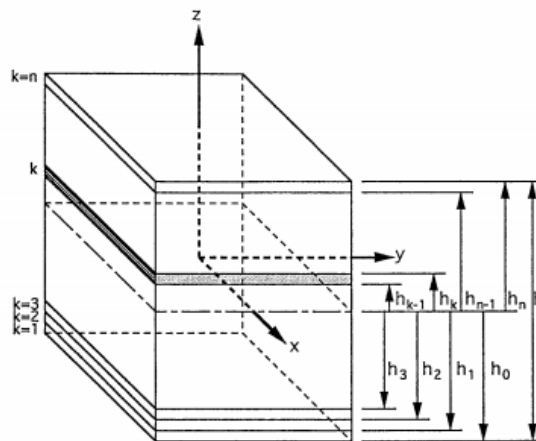
$$E_2 = \frac{E_m(1 + \xi_1 \eta_1 V_f)}{1 - \eta_1 V_f} \quad (22)$$

Onde

O parâmetro ξ_1 pode ser calculado pela equação (22) caso se tenha um resultado experimental de E_2 . Dessa forma, E_2 pode ser calculado para uma grande variedade de frações em volume de fibra.

Já para o laminado, ou seja, um conjunto de lâminas sobrepostas, como na Figura 12, temos seguinte relação de esforços e deslocamentos:

Figura 12: esquema de um laminado



Fonte: Engineering Mechanics of Composite Materials (DANIEL e ISHAI, 1994)

$$\begin{bmatrix} N_x \\ N_y \\ N_s \\ M_x \\ M_y \\ M_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{xx} & A_{xy} & A_{xz} & B_{xx} & B_{xy} & B_{xz} \\ A_{yx} & A_{yy} & A_{yz} & B_{yx} & B_{yy} & B_{yz} \\ A_{zx} & A_{zy} & A_{zz} & B_{zx} & B_{zy} & B_{zz} \\ B_{xx} & B_{xy} & B_{xz} & D_{xx} & D_{xy} & D_{xz} \\ B_{yx} & B_{yy} & B_{yz} & D_{yx} & D_{yy} & D_{yz} \\ B_{zx} & B_{zy} & B_{zz} & D_{zx} & D_{zy} & D_{zz} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \epsilon_x^0 \\ \epsilon_y^0 \\ \epsilon_z^0 \\ \gamma_{xy}^0 \\ \gamma_{yz}^0 \\ \gamma_{zx}^0 \end{bmatrix} \quad (23)$$

Na equação (23), N e M são respectivamente as forças e os momentos por unidade de comprimento, o parâmetro κ é a curvatura do laminado e o índice 0 indica que as deformações são referentes ao plano de referência, usualmente no centro do laminado. Os outros parâmetros são dados por:

$$A_{ij} = \sum_{k=1}^n Q_{ij}^k (h_k - h_{k-1}) \quad (24)$$

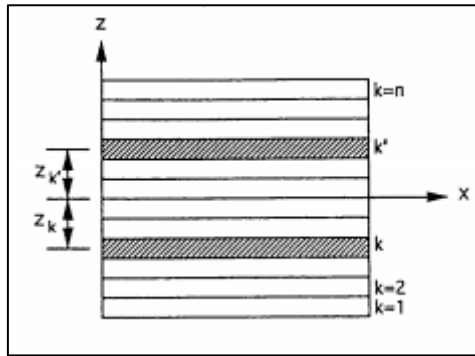
$$B_{ij} = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^n Q_{ij}^k (h_k^2 - h_{k-1}^2) \quad (25)$$

$$D_{ij} = \frac{1}{3} \sum_{k=1}^n Q_{ij}^k (h_k^3 - h_{k-1}^3) \quad (26)$$

$$\eta_1 = \frac{E_{2f} - E_m}{E_{2f} + \xi_1 E_m} \quad (27)$$

Nas equações de (24) a (26), k se refere ao laminado h à sua posição, como na Figura 12. Em alguns casos a equação (23) pode ser simplificada. No caso de um laminado simétrico, por exemplo, como na Figura 13, o estado de forças pode ser descrito como:

Figura 13: laminado simétrico



Fonte: Engineering Mechanics of Composite Materials (DANIEL e ISHAI, 1994)

$$\begin{bmatrix} N_x \\ N_y \\ N_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{xx} & A_{xy} & A_{xz} \\ A_{yx} & A_{yy} & A_{yz} \\ A_{zx} & A_{zy} & A_{zz} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \epsilon_x^0 \\ \epsilon_y^0 \\ \gamma_s^0 \end{bmatrix} \quad (28)$$

$$\begin{bmatrix} M_x \\ M_y \\ M_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} D_{xx} & D_{xy} & D_{xz} \\ D_{yx} & D_{yy} & D_{yz} \\ D_{zx} & D_{zy} & D_{zz} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \kappa_x \\ \kappa_y \\ \kappa_s \end{bmatrix} \quad (29)$$

Das equações (28) e (29) pode-se concluir que não há acoplamento entre as forças no plano e as curvaturas. Ainda no caso de um laminado simétrico, as constantes de engenharia podem ser escritas como:

$$\overline{E}_x = \frac{1}{h} \left[A_{xx} - \frac{A_{xy}^2}{A_{yy}} \right] \quad (30)$$

$$\overline{\nu}_{xy} = \frac{A_{xy}}{A_{yy}} \quad (31)$$

$$\overline{E}_y = \frac{1}{h} \left[A_{yy} - \frac{A_{xy}^2}{A_{xx}} \right] \quad (32)$$

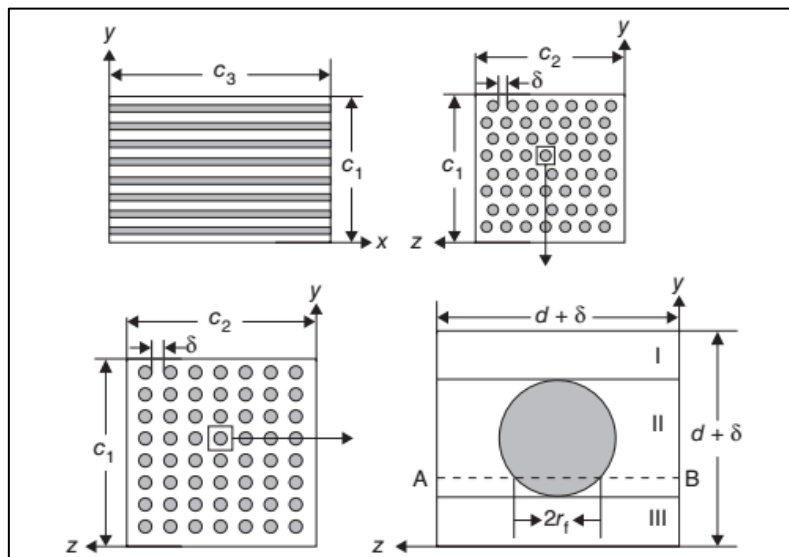
$$\overline{\nu}_{yx} = \frac{A_{xy}}{A_{xx}} \quad (33)$$

$$\overline{G_{xy}} = \frac{A_{ss}}{h} \quad (34)$$

A barra nos parâmetros calculados nas equações de (30) a (34) indica que as propriedades são referentes ao laminado em uma orientação xy arbitrária. (DANIEL e ISHAI, 1994)

Em 1998, foi desenvolvido uma maneira de se calcular o módulo de elasticidade transversal de um compósito de fibras unidirecional. Partindo de um elemento representativo contendo a seção transversal de uma fibra, como na Figura 14 e considerando que a adesão entre fibra e matriz é perfeita, o módulo de elasticidade transversal do compósito pode ser determinado pela seguinte fórmula (FU, LAUKE e MAI, 2009):

Figura 14: representação da fibra



Fonte: Engineering Mechanics of Composite Materials (DANIEL e ISHAI, 1994)

$$\frac{1}{E_{cy}} = \frac{\sqrt{\frac{4V_f}{\pi}}}{\sqrt{\frac{\pi V_f}{4}} E_{fy} + \left(1 - \sqrt{\frac{\pi V_f}{4}}\right) E_m} + \frac{1 - \sqrt{\frac{4V_f}{\pi}}}{E_m} \quad (35)$$

Alguns trabalhos discutem o cálculo das propriedades do compósito quando cada camada é de um material. Analisando um material composto de camadas de cobre intercaladas com camadas de plástico PMDS, de acordo com a Figura 12, o material seria isotrópico nas

direções x e y. De acordo com a pesquisa, quando os efeitos de Poisson são negligenciados, as equações (18) e (20) podem ser utilizadas, contanto que as propriedades da fibra e da matriz sejam substituídas por aquelas dos materiais A e B. Já quando as constantes de Poisson não podem ser negligenciadas, são propostas as seguintes relações (LIU, FENG e ZHANG, 2009):

$$E_z = \frac{E_A E_B}{V_A E_B + V_B E_A - \frac{2V_A V_B (v_A E_B - v_B E_A)^2}{(1 - v_A)V_B E_B + (1 - v_B)V_A E_A}} \quad (36)$$

$$E_x = \frac{V_A v_A E_A + V_B v_B E_B - V_A v_A v_B^2 E_A - V_B v_B v_A^2 E_B}{(V_A v_B E_A + V_B v_A E_B)^2 - (V_A E_A + V_B E_B)^2} \quad (37)$$

$$G_{xy} = V_A G_A + V_B G_B \quad (38)$$

Para compósitos de fibras curtas, o primeiro modelo a ser utilizado para módulo de elasticidade longitudinal foi o de Cox, em 1952. Segundo este modelo, o módulo de elasticidade na direção longitudinal de um compósito de fibras curtas alinhadas é dado por uma regra da mistura modificada:

$$E_c = \lambda E_f V_f + E_m (1 - V_f) \quad (39)$$

λ é um fator de comprimento da fibra e é dado por;

$$\lambda = \left(1 - \frac{\tanh\left(\frac{\eta l}{2}\right)}{\frac{\eta l}{2}} \right) \quad (40)$$

Onde

$$\eta = \sqrt{\frac{2G_m}{r_f^2 E_f \ln\left(\frac{R}{r_f}\right)}} \quad (41)$$

Onde G_m é o módulo de cisalhamento da matriz, E_f é o módulo de elasticidade da fibra, r_f é o raio da fibra e R a distância média entre os centros de fibras adjacentes (FU, LAUKE e MAI, 2009).

Outra maneira de se calcular as propriedades de um compósito de fibras curtas alinhadas é o descrito em (CAMPBELL, 2010). O módulo de elasticidade, nas direções longitudinal e transversal, o módulo de cisalhamento e o coeficiente de Poisson para esse compósito podem ser calculados pelas equações:

$$E_{11} = \frac{1 + 2\left(\frac{l_f}{d_f}\right)\eta_L V_f}{1 - \eta_L V_f} E_m \quad (42)$$

$$E_{22} = \frac{1 + 2\eta_T V_f}{1 - \eta_T V_f} E_m \quad (43)$$

$$G_{12} = G_{21} = \frac{1 + \eta_G V_f}{1 - \eta_g V_f} \quad (44)$$

$$\nu_{12} = \nu_f V_f + \nu_m V_m \quad (45)$$

$$\nu_{21} = \frac{E_{22}}{E_{11}} \nu_{12} \quad (46)$$

Onde

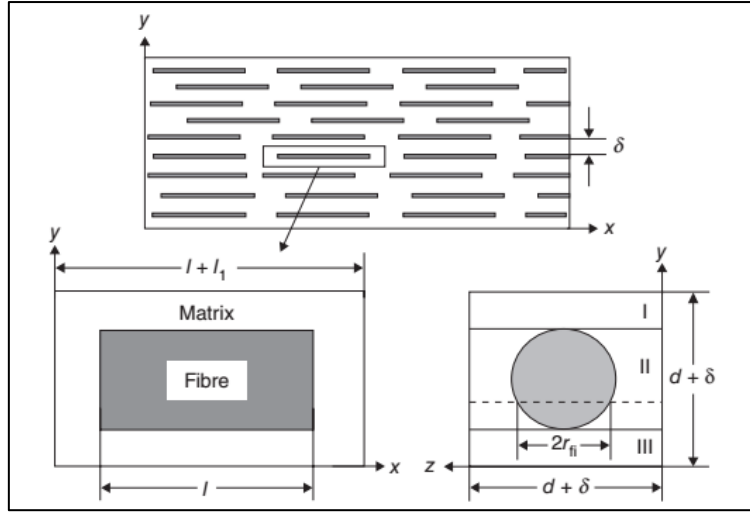
$$\eta_L = \frac{\left(\frac{E_f}{E_m}\right) - 1}{\left(\frac{E_f}{E_m}\right) + 2\left(\frac{l_f}{d_f}\right)} \quad (47)$$

$$\eta_T = \frac{\left(\frac{E_f}{E_m}\right) - 1}{\left(\frac{E_f}{E_m}\right) + 2} \quad (48)$$

$$\eta_G = \frac{(G_f/G_m) - 1}{(G_f/G_m) + 1} \quad (49)$$

Sendo que l_f e d_f são respectivamente o comprimento e o diâmetro da fibra. Em outro método desenvolvido em 1998, o módulo de elasticidade transversal pode ser também calculado pelo seguinte elemento representativo, mostrado na Figura 15:

Figura 15: esquema para o calculo do módulo de elasticidade transversal



Fonte: Science and Engineering of Short Fibre Reinforced Polymer Composites (FU, LAUKE e MAI, 2009)

Nesse caso, o módulo de elasticidade transversal pode ser calculado como:

$$\frac{1}{E_{cy}} = \frac{\sqrt{\frac{4V_f \left(1 + \frac{l_1}{l}\right)}{\pi}}}{\sqrt{\pi V_f / (4(1 + \frac{l_1}{l})) E_{fy}} + \left(1 - \sqrt{\frac{\pi V_f}{4(1 + \frac{l_1}{l})}} E_m\right)} + \frac{1 - \sqrt{\frac{4V_f \left(1 + \frac{l_1}{l}\right)}{\pi}}}{E_m} \quad (50)$$

Na equação (50), l_1 é o comprimento do elemento representativo e l é o comprimento da fibra (FU, LAUKE e MAI, 2009).

Caso a orientação das fibras seja aleatória, as propriedades do compósito podem ser estimadas pelas seguintes propriedades:

$$E_{aleatório} = \frac{3}{8} E_{11} + \frac{5}{8} E_{22} \quad (51)$$

$$G_{aleatório} = \frac{1}{8}E_{11} + \frac{1}{4}E_{22} \quad (52)$$

$$\nu_{aleatório} = \frac{E_{aleatório}}{2G_{aleatorio}} - 1 \quad (53)$$

Os parâmetros E_{11} e E_{22} das equações (51) e (52) são calculados com as equações (42) e (43) (CAMPBELL, 2010).

Já para compósitos reforçados com fibras longas, uma outra maneira de calcular as propriedades de um compósito de fibras longas em proporção entre 10 e 40% de peso e moldado por injeção é dividindo a espessura do compósito em cinco camadas distribuídas simetricamente em relação ao centro do compósito. Duas camadas externas compreendendo, cada uma, 25% da espessura total do compósito, duas camadas intermediárias abrangendo, cada uma, 20% da espessura do compósito e um núcleo de 15% da espessura total. Para cada camada, o módulo de elasticidade é calculado da seguinte forma:

$$E_L = \chi_f \eta_0 \eta_l E_f + (1 - \chi_f) E_m \quad (54)$$

Onde χ_f é a fração em volume de fibra, E_m é o módulo de Young da matriz e E_f o da fibra. Os outros parâmetros são dados por:

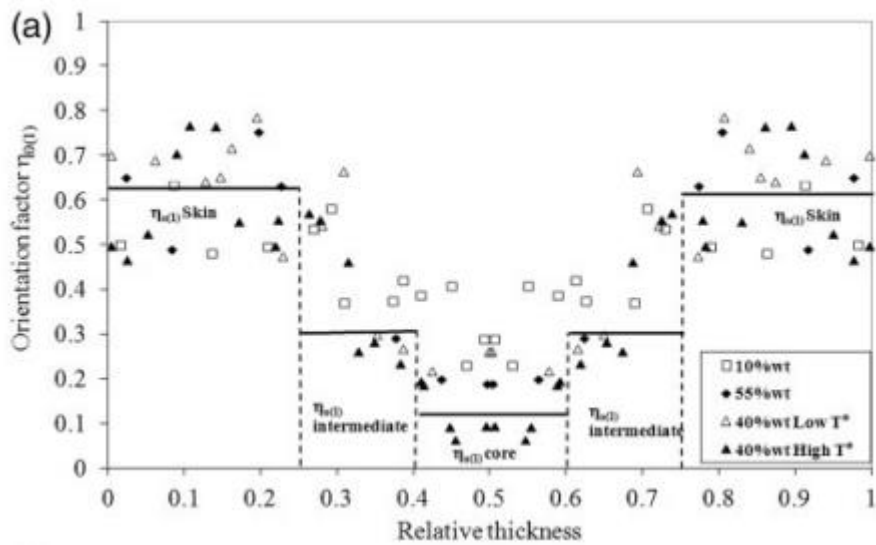
$$\eta_l = 1 - \frac{l_c}{2l_f} \quad (55)$$

$$l_c = \frac{r_f \sigma_{rf}}{\tau_u} \quad (56)$$

$$\eta_0 = \sum_i a_i \cos^4(\theta) \quad (57)$$

Nas equações de (55) a (58), l_c é o comprimento crítico da fibra (1.24mm); l_f é o comprimento da fibra; r_f é o raio da fibra; σ_{rf} é a resistência à tração da fibra; τ_u é a resistência ao cisalhamento na interface entre a fibra e a matriz e a_i é a proporção de fibra naquela camada direcionada em um ângulo θ em relação a uma direção de referência. Tendo como referência a direção do escoamento, os valores de η_0 podem ser estimados como na Figura 16 (LEFRANCHE, COULON, *et al.*, 2017):

Figura 16: distribuição da orientação da fibra ao longo da espessura no compósito



Fonte: A microstructural approach for modelling flexural properties of long glass fibre reinforced polyamide 6.6 (LEFRANCHE, COULON, *et al.*, 2017)

2.13 POLÍMEROS E COMPÓSITOS POLIMÉRICOS NO SETOR AUTOMOTIVO

O uso de polímeros e compósitos poliméricos em automóveis têm crescido nos últimos anos e, principalmente após as resoluções do CAFE, continuará crescendo. Os polímeros têm a vantagem de serem fabricados em formas mais complexas, permitindo maior liberdade no design, com maior funcionalidade e economia de combustível devido à redução de peso (STRUMBERGER, GOSPOCIC e BARTULIC, 2005).

Nesse trabalho, o automóvel é dividido em seis partes onde são encontrados os polímeros, de acordo com (SEHANOBISH, 2009), são elas: interior do veículo, painéis verticais e horizontais, exterior, grupo moto propulsor, sistema de combustível e sistema de iluminação.

2.13.1 Interior do veículo

O interior é a parte do veículo que mais emprega polímeros. O painel de instrumentos, anteriormente era feito de metais e tinha que ser pintado e unido por outras estruturas metálicas. Os polímeros primeiramente surgiram no intuito de melhorar a estética dos metais, mais ao longo do tempo foram adotados para substituir toda a estrutura do painel. Um tipo de polímero utilizado no painel de instrumentos é um poliestireno, o estireno anidrido maleico (SMA), comercializado sob o nome DYLARK. Devido ao aumento da inclinação dos para-brisas, os painéis ficaram mais expostos ao calor, devendo possuir resistência térmica e estabilidade termal, requisitos preenchidos pelo DYLARK reforçado por fibra de vidro [17]. Outro exemplo

de materiais poliméricos encontrados no painel de instrumentos é a poliamida reforçada com fibra de vidro ou de polipropileno reforçado com fibras longas de vidro, como no caso do veículo Skoda Fabia (STRUMBERGER, GOSPOCIC e BARTULIC, 2005).

Alguns polímeros também muito utilizados no interior dos veículos são: ABS, combinação de ABS e policarbonato, ABS reforçado com fibra de vidro e polipropileno. Atualmente, a mistura de policarbonato com ABS é mais utilizada devido à sua rigidez e resistência superiores (SEHANOBISH, 2009).

O polipropileno é extensivamente usado como tecido nos assentos, forro do teto e forro das portas laterais. As espumas dos assentos costumam ser de espuma de poliuretano (AKINDOYO, BEG, *et al.*, 2016). Junto com o polietileno, o polipropileno está incluído na classe das poliolefinas. Essa classe de polímeros é muito requisitada no setor automotivo por causa do seu baixo peso específico, alta capacidade de ser moldado por injeção e de ser reciclado. Painéis interiores de portas, como a do Dodge Caliber e a do Jeep Compass são feitos de poliolefinas (SEHANOBISH, 2009).

O encosto dos acentos é uma parte do veículo muito regulamentada em termos de segurança. Uma mistura de policarbonato e ABS foi introduzida com sucesso no encosto dos bancos em 2006, no Audi TT, e posteriormente foi adotado por outras montadoras (SEHANOBISH, 2009). Os assentos podem também ser encontrados em poliamida reforçada com fibra de vidro, como no Mercedez Benz Classe A (STRUMBERGER, GOSPOCIC e BARTULIC, 2005).

A fibra de vidro é muito utilizada também como reforço para ABS e polipropileno no interior de carros. Esses compósitos têm propriedades superiores aos dos polímeros não reforçados, além da capacidade de serem moldados por injeção. Uma aplicação de ABS reforçado com fibra de vidro é o fixador do painel de instrumentos (SEHANOBISH, 2009).

A introdução de peças poliméricas no conjunto de pedais, feita pela primeira vez em 1999, pela empresa Ford, propiciou uma redução de 50% no peso do conjunto e de 50% no número de peças (STRUMBERGER, GOSPOCIC e BARTULIC, 2005).

Volantes são encontrados feitos de resina vinil-éster ou uretano, sendo que essa última substância é processada pelo por RIM. Já os airbags são majoritariamente feitos de Nylon 6,6 (SEHANOBISH, 2009).

2.13.2 Painéis verticais e horizontais

É uma aplicação que demanda muito das peças. O material que constitui os painéis horizontais e verticais precisa ter coeficientes de expansão térmica muito baixos, além de ter que resistir às altas temperaturas de algumas partes da linha de montagem (SEHANOBISH, 2009).

A General Motors é pioneira na utilização de painéis feitos em materiais compósitos, fabricando desde 1953 o Corvette, cujos painéis são de termofixo reforçado por fibra de vidro (STRUMBERGER, GOSPOCIC e BARTULIC, 2005). Os primeiros termoplásticos utilizados também foram introduzidos pela General Motors na linha de veículos Saturn, consistindo em uma mistura de PC e ABS utilizada no painel externo das portas (SEHANOBISH, 2009). Em 1980 a porta traseira de um Oldsmobile foi a primeira feita por moldagem a compressão utilizando SMC. (STRUMBERGER, GOSPOCIC e BARTULIC, 2005)

Essas inovações abriram as portas para os polímeros serem utilizados em muitas outras aplicações, como tetos, painéis de portas, para-lamas e outros painéis, produzidos por moldagem a compressão, RTM e RIM.

2.13.3 Exterior do veículo

O primeiro para-choque feito em poliuretano produzido por moldagem a injeção reativa foi o do Chevrolet Monza, em 1975 (STRUMBERGER, GOSPOCIC e BARTULIC, 2005). Os polímeros foram adotados de vez para essas aplicações nos anos 80, devido ao seu baixo peso, melhoramento estético, baixa corrosão e fácil projeto. Hoje, os para-choques também podem ser constituídos de ABS e misturas de ABS com policarbonato. Geralmente, os termoplásticos têm ganhado preferência pela indústria pois o tempo de cura dos termofixos e a impossibilidade de reciclá-los os torna não muito atrativos se comparados aos termoplásticos (SEHANOBISH, 2009). A maneira mais comum de se processar os termoplásticos é a moldagem por injeção, técnica utilizada para a fabricação dos para-lamas da Land Rover e do Renault Clio.

A maçaneta externa dos veículos é uma de suas partes que se tornou predominantemente fabricada por plásticos. Misturas de policarbonato com polibuteno tereftalato, polietileno tereftalato e Nylon são encontradas em maçanetas externas, sendo que o Nylon é o mais usado. Os encaixes dos retrovisores também são majoritariamente encontrados em plásticos como o ABS, policarbonato com ABS e, entre outros, nylon (SEHANOBISH, 2009).

A Chevy Silverado, foi a primeira a ter a parte interna da carroceria feita em compósito de poliuretano com fibra de vidro. Outros projetos de para-choques feitos de compósito de poliuretano têm permitido maior segurança dos pedestres, podendo reduzir significativamente a

seriedade dos ferimentos em caso de acidente (SEHANOBISH, 2009). Capôs também podem ser encontrados em compósitos poliméricos a base de fibra de carbono ou fibra de vidro, mas seu custo ainda é bem proibitivo em relação às soluções em metais (SEHANOBISH, 2009). Aqueles feitos de fibra de carbono costumam ser fabricados especialmente para carros de alta tecnologia, como o capô do Maserati Granturismo (POVEDA e GUPTA, 2016).

2.13.4 Grupo moto-propulsor

O aumento da tecnologia proporcionou melhoramentos nas propriedades dos polímeros que permitissem seu uso nesse sistema que exige muito de seus componentes. Em alguns motores da BMW, por exemplo, pode-se encontrar polímeros na entrada de ar, na tampa da cabeça dos cilindros, no compartimento dos filtros de ar e sistemas de recirculação de gases exauridos (STRUMBERGER, GOSPOCIC e BARTULIC, 2005).

Polibutileno tereftalato (PBT) é utilizado nos conectores elétricos e eletrônicos do motor, disjuntores, controles e vários invólucros. O PBT puro não é normalmente usado na indústria automotiva, mas em conjunto com resinas modificadoras oferece grande resistência química, resistência dielétrica, boas propriedades a altas e baixas temperaturas e resistência a chama.

A entrada de ar do motor costuma ser de polímeros não só pela redução de peso e custo, mas pela possibilidade de otimizar a entrada de ar com geometrias mais complexas, resistência à corrosão e redução de ruído. Normalmente são feitas de Nylon (SEHANOBISH, 2009).

O material mais importante em aplicações no motor é a poliamida e na maioria dos casos é reforçado com fibra de vidro. Outro material importante é o polietileno de alta densidade, utilizado na fabricação de tanques de combustível, fabricados por moldagem a sopro, tendo de cerca de 10 a 11 kg a menos do que os equivalentes em metais (STRUMBERGER, GOSPOCIC e BARTULIC, 2005).

2.13.5 Sistema de combustível

Os tanques de combustível são as maiores peças do sistema e as que mais utilizam materiais poliméricos. São majoritariamente fabricados por moldagem a sopro e são feitos de polipropileno de alta densidade (HDPE) (SEHANOBISH, 2009). Apesar de inicialmente os tanques de combustível plásticos serem controversos devido a sua permeabilidade em relação ao vapor do combustível, as empresas, como a TI automotiva, desenvolveram tanques com múltiplas camadas de polímeros, que reduz sua permeabilidade, fazendo-os cumprir requisitos como PZEV (Partial Zero Emission Vehicle) (MOLINARO, 2003).

Nylon também pode ser encontrado em rebites internos e externos e em uma variedade de conectores, que aproveitam da dureza e dutilidade do Nylon 6,6. Caixa de vapor de combustível é outra aplicação onde Nylon pode ser encontrado.

2.13.6 Sistema de Iluminação e rodas

Os faróis dos veículos são quase em sua totalidade feitos de policarbonato, que apresenta alta resistência a temperatura e a batidas, além de ter baixo peso e poder ser moldado em praticamente qualquer forma (SEHANOBISH, 2009).

Os polímeros têm servido bem ao propósito decorativo dos pneus. As calotas escondem os parafusos e as conexões do pneu e são geralmente feitas de ABS, com algumas versões cromadas.

2.14 ENGENHARIA DE CARROCERIA

Como mencionado anteriormente, a Chevrolet Silverado foi a primeira a ter uma carroceria de poliuretano reforçado com fibra de vidro (STRUMBERGER, GOSPOCIC e BARTULIC, 2005). Essa carroceria era moldada a partir de uma estrutura de fibra pré-formada, fornecida pela empresa Owens Corning, e era considerada a maior estrutura pré-formada da época (Composite pickup box, 1999). O processo de implementação se deu também junto com a empresa Bayer, que desenvolveu o processo HD-SRIM e que junto com a General Motors avaliaram mais de 200 formulações de poliuretano para encontrar aquela que preenchesse os requisitos da GM. Além da fibra de vidro pré-formada, o compósito contava com fibra de vidro picada e em tecido não pré-formado. Junto com outras partes do veículo feitas de compósitos poliméricos, reduziu o peso da pick-up em 23kg (SRIM system for composite pickup box, 2000). De acordo com a GM, o compósito utilizado na Silverado seria capaz de resistir à arranhões, cortes, arranque de lascas, ferrugem e tolera temperaturas extremas (MOLINARO, 2000).

Em 2000, a Ford ganhou o prêmio Body Exterior Award pela carroceria da pick-up Ford Explorer Sport Track. Nessa versão, uma única peça de material compósito substituiu 45 peças de metais soldadas, economizando 21 quilos em relação à sua versão metálica. Essa carroceria, ao contrário daquela da Chevrolet Silverado, foi fabricada por moldagem a compressão, utilizando SMC de vinil ester reforçado por fibra de vidro em 50%, desenvolvido pela empresa Budd Plastics Division (BLANCO, 2000). Nos testes de resistência da carroceria, um tambor com capacidade de 55 galões foi jogado verticalmente e diagonalmente de uma altura de 3 polegadas e uma tonelada de tijolos foi derrubada de uma altura de 8,5 pés. No final dos testes

a carroceria não apresentou nenhum corte ou entalhe (Ford picks new composite for bedliner, 2000).

Em 2005, a Honda lançou sua caminhonete Ridgeline, cuja carroceria é formada de material compósito, posicionado sobre três barras de metal. Sendo de material compósito, a carroceria apresenta características que as de metal não tem, como resistência a corrosão, superfície antiderrapante e um compartimento sob esta. Esse compartimento seria impossível em uma carroceria de metal, que normalmente apresenta muitas peças soldadas. Uma complexidade a mais no formato, como esse compartimento, adicionaria muito custo ao projeto, além do alto risco de mal funcionamento. A carroceria da Honda consiste em menos de 10 peças e foi inspirada na competidora Chevrolet Silverado. O compósito é formado por um filme de polietileno, sobre o qual é dispersada uma mistura de poliéster e resina vinil. No topo dessa mistura é adicionada fibra de vidro picada e em seguida mais um filme plástico e outro de resina. Esse material é aquecido a 140 graus Celsius e conformado na carroceria (CHAPPELL, 2005).

Nesse mesmo período, a Toyota também lançou suas pick-ups Tacoma com carrocerias feitas em compósitos. Essa carroceria foi produzida de um SMC, pela TyssenKrupp-Budd, cortando o peso em 10% e o custo do ferramental em 50% (JACOB, 2005).

Em sua atualização mais recente, os painéis da Honda Ridgeline têm a função inovadora de autofalante. Normalmente, os autofalantes são em formatos de cones, que vibram e produzem o som, na Honda Ridgeline 2017, os painéis laterais vibram e exercem essa função (TRUETT, 2016).

2.15 DESEMPENHO VEICULAR: RIGIDEZ À TORÇÃO E À FLEXÃO

A rigidez estrutural de um veículo pode ser definida como a habilidade de suportar cargas sem mudanças significativas em sua geometria. Com a indústria automotiva lutando arduamente para reduzir o peso de seus veículos, de modo que emitam menos gases de efeito estufa, se torna um desafio cada vez maior aumentar ou manter a rigidez estrutural dos veículos sem que isso afete seu peso. Para isso, o processo de reforço estrutural deve considerar estruturas otimizadas e materiais de alto desempenho.

Além de interferir significativamente na segurança veicular, podendo ocasionar na intrusão excessiva de componentes na cabine de passageiro, a baixa rigidez pode causar instabilidade e ruídos no veículo.

Os polímeros reforçados com fibras são inerentemente menos rígidos do que o aço. No entanto, existem alguns fatores que compensam essa perda de rigidez devido às características mecânicas do material. Uma delas é que o compósito pode ter uma espessura maior e ainda sim promover uma redução no peso do componente, devido a sua densidade sensivelmente menor. Outra vantagem, talvez a mais significativa, reside na possibilidade de integrar partes, o que leva na eliminação de juntas e no maior sinergismo.

O cálculo da rigidez do veículo é dado, de acordo com normas internas do grupo FCA. A rigidez torsional é dada pela equação (58):

$$K_T = \frac{T}{\theta} = \frac{T}{\left(\operatorname{atan}\left(\frac{z_1 - z_2}{b}\right) - \operatorname{atan}\left(\frac{z_3 - z_4}{d}\right) \right) \frac{180}{\pi}} \quad (58)$$

Onde:

T – Torque aplicado;

z_{1-4} - Deslocamento vertical dos pontos de 1 a 4, de acordo com a Figura 17;

a – Distância entre os pontos 1 e 2;

b – Distância entre os pontos 3 e 4;

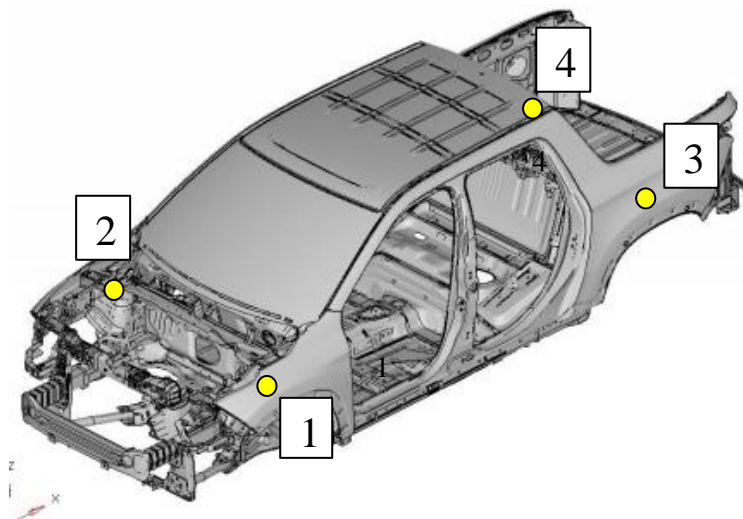


Figura 17: Pontos de medição para o teste de rigidez a torção

Já a rigidez flexional é calculada pela equação (59):

$$K_B = \frac{F}{z} = \frac{F}{\left(\frac{z_1 - z_2}{2} \right) - \left(\frac{z_3 + z_4 + z_5 + z_6}{4} \right)} \quad (59)$$

Onde:

F – Força aplicada;

z_{1-6} - Deslocamento vertical dos pontos de 1 a 6, de acordo com a Figura 18;

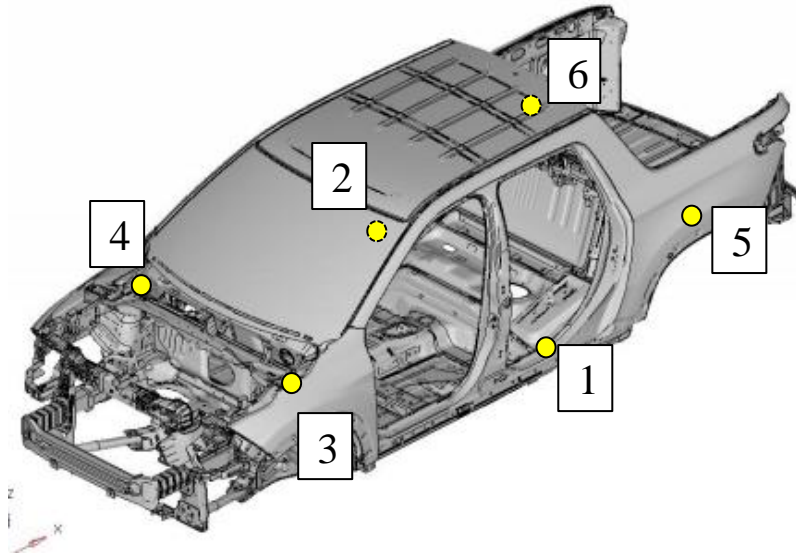


Figura 18: Pontos de medição para o teste de rigidez a flexão

2.16 FUNDAMENTOS DE TRANSMISSÃO DE CALOR

Devido à incidência de irradiação solar nos veículos no período diurno, tanto o interior quanto o exterior do veículo atingem temperaturas que chegam a aproximadamente 100°C. Como os polímeros perdem significativamente sua rigidez com altas temperaturas, faz-se necessários o teste de sua performance quando sua temperatura é crítica (BERGMAN, LAVIGNE, *et al.*, 2011)

Para o cálculo das temperaturas em um componente, pode-se utilizar as equações fundamentais de transferência de calor. Caso a parte em estudo tenha uma espessura muito menor do que o tamanho do componente como um todo, pode-se utilizar a equação (60) para calcular-se as temperaturas envolvidas em um processo de condução:

$$q'' = k(T_1 - T_2)/L \quad (60)$$

Onde:

q'' – Fluxo de calor (W/m^2);

k - Coeficiente de condutividade térmica (W/mK);

L – Espessura do componente (m);

T – Temperatura entre as superfícies do componente (K);

Considerando um caso em que um componente bidimensional, como o descrito, esteja sujeito a troca de calor por convecção livre, pode-se usar a seguinte equação (61):

$$q'' = h(T_1 - T_\infty) \quad (61)$$

Onde:

k - Coeficiente de condutividade térmica (W/mK);

L - Espessura do componente (m);

T_1 - Temperatura da superfície do componente (K);

T_∞ - Temperatura do ambiente (K);

Já para os processos de transferência de calor por radiação, tem-se a equação (59):

$$q''_{rad} = F_{ij}\sigma(T_1^4 - T_w^4) \quad (62)$$

Onde:

F_{ij} - Fator de forma

σ - constante de Steffan - Boltzman ($5,67 \times 10^{-8} W/(m^2 \cdot K^4)$)

T_1 - Temperatura entre as superfícies do componente (K);

T_w - Temperatura das paredes do recinto (K);

As trocas de calor podem ser esquematizadas e calculadas utilizando uma abordagem inspirada nos circuitos elétricos, onde cada superfície é um nó, e os meios que transmitem calor de uma superfície para a outra são resistências, como mostrado na Figura 19:

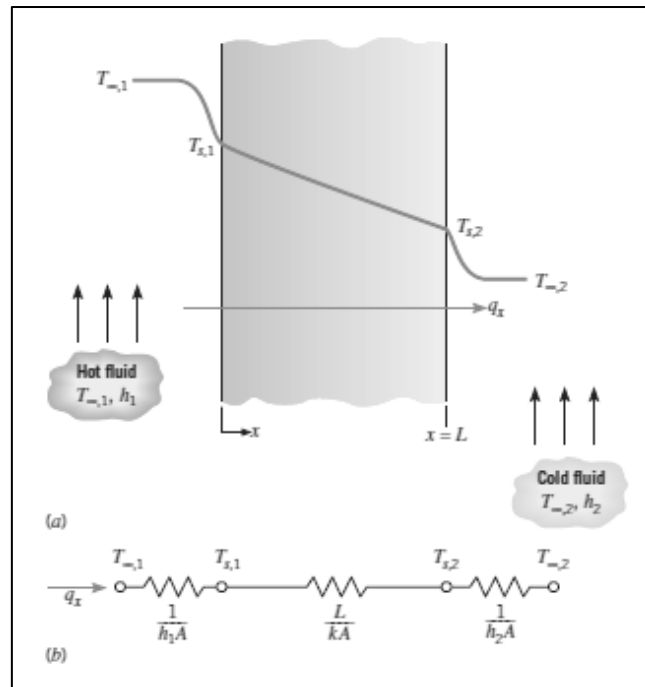


Figura 19: Abordagem de resistências para a transmissão de calor
 Fonte: Bergman, et al. 2011

Essa abordagem é muito útil quando se fala de troca de calor entre painéis de materiais diferentes.

3 METODOLOGIA

Para o estudo de viabilidade da substituição de materiais metálicos por materiais compósitos, serão levadas a diante as seguintes etapas:

3.1 BENCHMARKING

Nessa primeira etapa, serão analisados diferentes veículos, no intuito de verificar qual o impacto do material compósito nestes. Para que diferentes portes de veículos possam ser comparados, o volume da caçamba será dividido pela massa de sua estrutura, de modo que essa razão será utilizada para comparar os veículos. Quanto maior o seu valor, mais eficiente o veículo é, utilizando menos massa em sua estrutura para que sua caçamba possa carregar um certo volume de carga.

3.2 ANÁLISE DE MATERIAIS

Nessa fase do projeto, busca-se identificar possíveis materiais que possam reduzir o peso do veículo ao máximo e ao mesmo tempo atender aos requisitos de performance. Devido a ampla possibilidade de materiais a serem investigados, o estudo foi restringido àqueles que já constam no catálogo de materiais já utilizados pela Fiat, bem como aqueles que possam ser obtidos de fornecedores que já trabalham com a empresa. Uma outra restrição imposta aos materiais é que estes sejam termoplásticos, o que permite que estes sejam processados por moldagem por injeção, que é o tipo de processamento mais comumente encontrado entre os fornecedores.

Tendo em vista as restrições acima, foram escolhidos os materiais que apresentam a melhor razão entre a resistência a tração e a densidade. A princípio, aquele material que apresenta o maior valor dessa razão, conseguiria atender à performance exigida e reduzir seu peso do veículo o máximo possível.

3.3 DESIGN DE NOVAS PARTES

Nessa parte busca-se fazer um projeto básico das partes que serão substituídas por polímero reforçado. Essa parte visa demonstrar que o fato de partes tradicionalmente metálicas serem feitas por polímero reforçado permite que um novo arranjo de peças seja utilizado, com

mais liberdade de design e com a possibilidade de reduzir o número de partes e consequentemente o número de operações e o custo da montagem.

Devido ao grande número de variáveis a serem consideradas nessa parte, o projeto, como dito, foi simplificado. A simplificação ocorre, sobretudo, em relação às conexões com o restante do veículo. Além do mais, são consideradas apenas as variáveis mais básicas do processo de injeção. Apesar dessa simplificação, o design e a análise mostraria que há potencial para fabricação ou que o projeto é completamente inviável desde sua concepção.

3.4 ANÁLISE DA PERFORMANCE DO VEÍCULO, EM TERMOS DE RIGIDEZ E DISTRIBUIÇÃO DE TENSÕES

Após identificar as vantagens do uso do polímero reforçado pelo processo de benchmarking, pesquisar dentre os materiais aquele que suporta as cargas necessárias acrescentando menos peso e projetar preliminarmente as partes fabricadas em material polimérico reforçado, a estrutura deve ser virtualmente testada para que seja verificado se a pick-up com a estrutura da caçamba feita com o material alternativo atende aos requisitos de performance.

Os testes consistirão no que é descrito nos tópicos a seguir.

3.4.1 Análise de rigidez torcional

Nesse teste, busca-se verificar se o veículo, quando submetido a um esforço de torção ao longo de seu eixo, possui rigidez à torção acima de um valor mínimo permitido. Essa rigidez é calculada com base no deslocamento angular da parte dianteira do veículo em relação ao deslocamento angular da parte traseira.

Esse deslocamento é medido de acordo com a equação (59). No teste, um torque de 2000Nm é aplicado no ponto 3 da Figura 20. Os pontos 1 e 2 são as extremidades de uma estrutura rígida ligada ao modelo virtual do veículo e estão engastados.

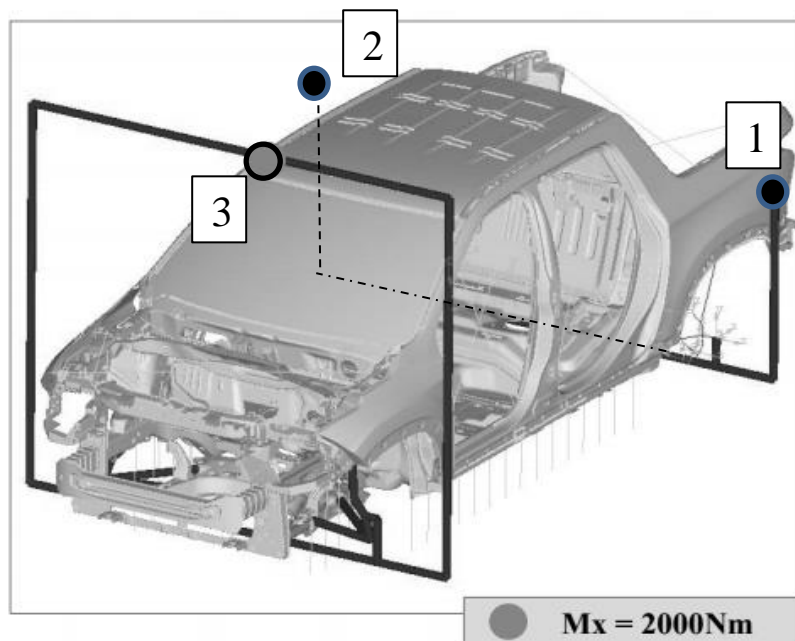
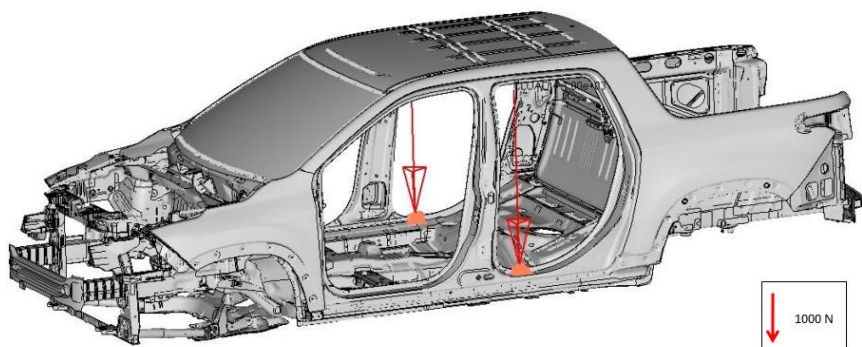


Figura 20: esquema do teste virtual de rigidez à torção

3.4.2 *Análise de rigidez flexional*

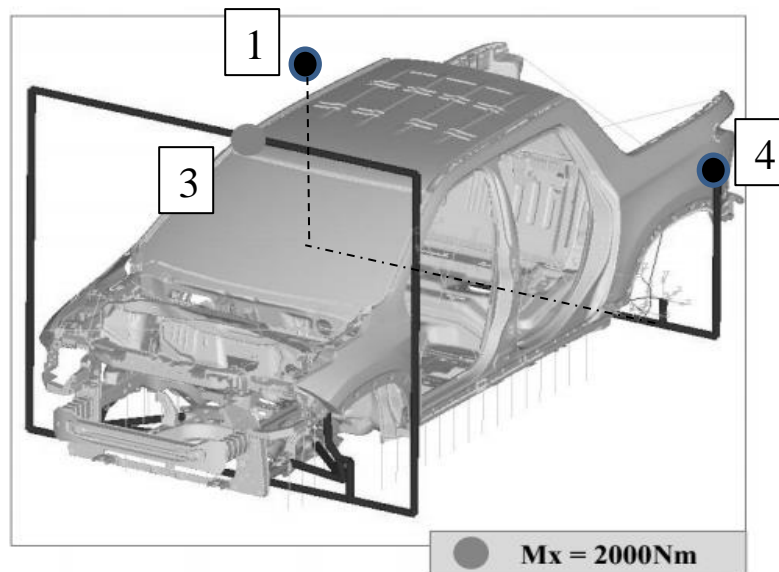
O teste de rigidez flexional consiste em aplicar uma carga localizada no centro do veículo, com as extremidades do carro fixas e verificar o quanto o centro do veículo se desloca em relação as extremidades. Essa deflexão é calculada pela equação (59). Uma carga de 1000 N é aplicada em cada um dos pontos mostrados na Figura 21. No modelo virtual utilizado, cujo esquema é representado na Figura 21, os pontos de 1 a 4, extremidades de uma estrutura rígida ligada ao veículo, podem rotacionar, mas não podem transladar.

Figura 21: pontos de aplicação de carga no teste de rigidez à flexão



Fonte: FCA Brasil, 2017

Figura 22: esquema do teste virtual de rigidez a flexão



Fonte: FCA Brasil, 2017

3.4.3 *Análise Modal*

A análise modal consiste em submeter o veículo a vibração livre-livre com o intuito de se definir pontos de baixa rigidez da caçamba. São considerados pontos de baixa rigidez as regiões apontadas na análise modal como tendo maior amplitude dentro da faixa de frequência de trabalho, que vai de 0 Hz a 110 Hz.

3.4.4 *Análise de Rigidez Localizada*

Com base na análise modal realizada na etapa anterior, busca-se fazer um ensaio virtual da rigidez nos pontos de baixa rigidez. Esse teste virtual resume-se simulação da aplicação de um cilindro rígido de 250mm de diâmetro nessas regiões, a uma força de 2500 N. Determina-se então o deslocamento da região onde foi aplicada a força e esta é comparada aos valores máximos de deslocamento constantes nas normas de performance da FCA.

4 DESENVOLVIMENTO

Na primeira etapa do trabalho, foi realizada uma pesquisa a respeito do uso de materiais compósitos em carrocerias. Essa pesquisa tem como objetivo identificar caminhonetes de diversas marcas que utilizam caçamba em material compósito e determinar o efeito no peso da estrutura da aplicação destes materiais, comparando-as com veículos que fazem uso de estrutura metálica tradicional.

Foram investigados duas pick-ups que utilizam materiais compósitos em suas estruturas. Essas pick-ups serão denominadas neste trabalho, como pick-ups A e B. Elas são comparadas com três pick-ups do grupo Fiat Chrysler, C, D e E. Como esses veículos possuem portes diferentes, utilizou-se razão entre o volume da caçamba e o peso dos componentes da estrutura para que pudessem ser comparados, sendo que um valor alto para essa razão significa que o veículo possui uma caçamba mais eficiente, suportando mais carga utilizando menos peso em sua estrutura.

A medição do peso dos componentes foi feita com base nos dados obtidos da base de dados A2Mac, ou estimadas pelas dimensões e pelo material dos componentes. Os resultados são mostrados na Tabela 1:

Tabela 1: Dados da análise de mercado

| Veículo | Massa dos componentes da estrutura da caçamba (Kg) | Volume da caçamba (litros) | Volume/massa (litros/Kg) |
|---------|--|----------------------------|--------------------------|
| A | 54,6 | 1248 | 22,86 |
| B | 34,9 | 1169 | 33,49 |
| C | 48,2 | 820 | 17,01 |
| D | 27,0 | 580 | 21,49 |
| E | 100,5 | 1504 | 14,97 |

Fonte: FCA Brasil, 2017

Como pode ser observado pela tabela, das pick-ups A e B, não pertencentes ao grupo FCA, a caminhonete B possui a estrutura de caçamba mais eficiente, o que pode ser explicado pelo fato de sua estrutura ser completamente em compósito. Essa mesma característica não está presente na pick-up A, pois os painéis compósitos laterais não substituem completamente a estrutura metálica, o que diminui sua eficiência.

Das pick-ups analisadas que são pertencentes ao grupo FCA, os modelos C e D possuem razões muito semelhantes de peso por volume. O modelo E, por sua vez, possui a

estrutura menos eficientes de todas as analisadas, o que quer dizer que sua estrutura é muito pesada em relação aos outros modelos analisados. Percebe-se que a eficiência da estrutura decresce a medida que o porte do veículo aumenta. Destas pick-ups, o modelo C será utilizado como referência para o estudo da utilização de polímero reforçado na estrutura da caçamba.

Seguindo a metodologia proposta, a etapa seguinte seria a busca de materiais que poderiam ser utilizados no veículo C em substituição à estrutura metálica. A busca por possíveis materiais foi realizada dentro daqueles que já estão dentro do catálogo de materiais já utilizados pela FCA ou que poderiam ser encontrados em seus fornecedores. A pesquisa também foi restringida àqueles materiais que pudessem ser processados via moldagem por injeção, que é o processo mais utilizado e que possibilita a produção de grande volume de peças. Os potenciais materiais selecionados estão presentes na Tabela 2:

Tabela 2: Materiais pesquisados

| Material | Nome comercial | Resistência | | |
|------------------|-------------------------------------|-----------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|
| | | a tração – 23°C (MPa) | Densidade (Kg/m ³) | Resistência a tração/densidade |
| PA 66 | CELSTRAN PA 66 40 Natural | 215 | 1450 | 0,15 |
| PA 66 | CELSTRAN PA66 GF 30 BLACK | 160 | 1360 | 0,12 |
| PA 66 | CELSTRAN PA 66 GF50- 02 | 180 | 1570 | 0,11 |
| PA 66+PTFE+FV | LNP Lubricomp RFL36S BK1A842BRLM | 155 | 1500 | 0,10 |
| PP | PP 150.80 HC | 104 | 1140 | 0,09 |
| PP | Xmod GD301HPB/P001 | 104 | 1140 | 0,09 |
| PA 6 | Durethan BKV 50 H2.0 | 140 | 1570 | 0,09 |
| PC+ABS | Bayblend® T88 GF-10 | 95 | 1220 | 0,08 |
| PP | PP 120.60 | 77 | 1110 | 0,07 |

Fonte: FCA Brasil, 2017

Os materiais foram comparados entre si tomando como base a razão entre a resistência a tração e a densidade desses polímeros. A resistência a compressão geralmente é maior do que a de compressão e Essa razão permite não só identificar o material que resiste às cargas aplicadas ao veículo, mas também identificar a aquele que faz isso acrescentando o mínimo de massa possível a estrutura do veículo. Pode-se notar pela Tabela 2 que o PA66 reforçado com 40% de fibra de vidro é aquele com propriedades mais favoráveis. Além disso, como visto anteriormente, o Nylon se enquadra na categoria de polímeros de engenharia, possuindo uma boa resistência ao calor, o que é uma característica desejável, já que a caçamba de uma pick-up frequentemente fica exposta a radiação solar e consequentemente, submetida a temperaturas elevadas.

Para que as propriedades do material fossem determinadas de forma precisa, foi feito um teste de tração em cinco corpos de prova, de acordo com a norma ISO 527. O resultado do teste está evidenciado na Figura 23:

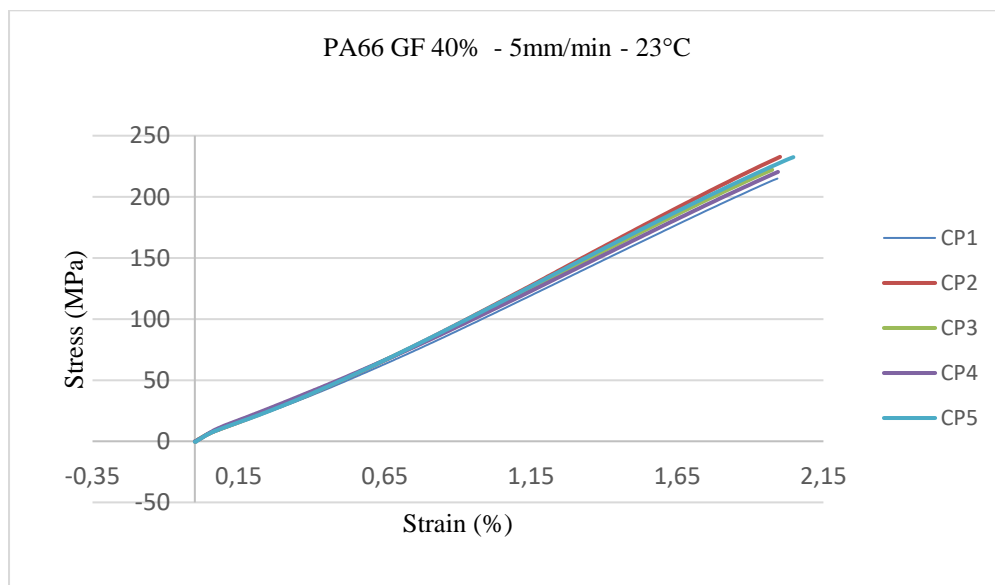


Figura 23: curva de tensão x deformação do PA66 40%

Da Figura 23, pode-se extrair para cada corpo de prova os valores da resistência a tração e do módulo de elasticidade, mostrados na Tabela 3. Também desta figura, pode-se notar que, a 23° C, o diagrama de tensão e deformação apresentam um comportamento linear, mostrando

que o material possui um comportamento essencialmente elástico, praticamente sem deformação plástica antes da ruptura. Esse aspecto é de grande valia, pois quando as simulações computacionais forem processadas, poderá ser realizada uma análise linear, exigindo menos custo computacional.

Tabela 3; Média dos módulos de elasticidade e da resistência à tração

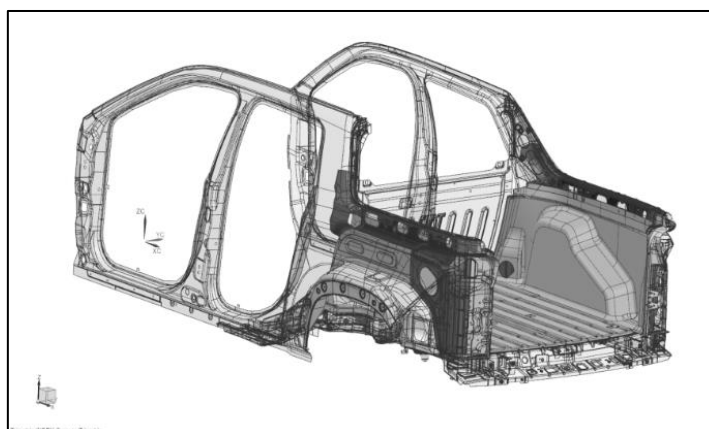
| Propriedade | Spec.1 | Spec. 2 | Spec. 3 | Spec. 4 | Spec. 5 | Média |
|-----------------------------------|--------|---------|---------|---------|---------|--------|
| Módulo de Young (GPa) | 11,59 | 12,71 | 12,18 | 11,75 | 12,37 | 12,12 |
| Resistência a tração (MPa) | 214,89 | 232,67 | 222,12 | 220,35 | 232,43 | 224,49 |

Realizadas as etapas de benchmarking e análise de materiais, seguindo a metodologia estabelecida na sessão anterior deste trabalho, será efetuado o projeto de novas partes, formadas de polímero reforçado, para que sejam utilizadas em substituição à estrutura metálica do veículo C do grupo FCA.

O projeto dessas novas partes será básico, pois o projeto definitivo e detalhado exige uma elaboração que foge do escopo principal deste trabalho, que é o de analisar a viabilidade do uso de materiais poliméricos reforçados na estrutura da caçamba de uma pick-up. Mesmo sendo básico, o projeto segue algumas diretrizes de projeto que para que não seja um projeto impossível já na sua fase mais preliminar.

Para que esse projeto seja levado adiante, é necessário que seja realizada uma análise a estrutura do veículo na forma como ela é originalmente. A sua atual configuração está ilustrada na Figura 24:

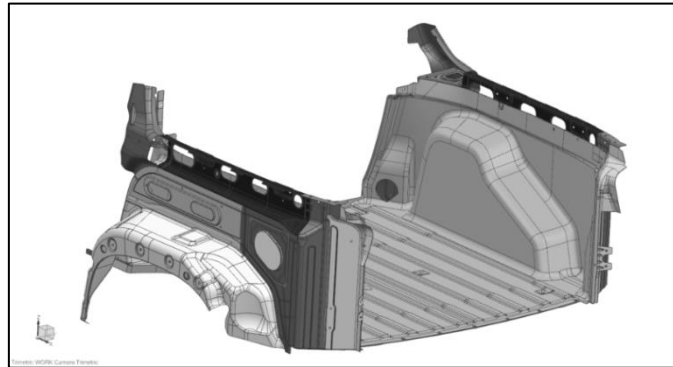
Figura 24: Componentes atuais da caçamba



Fonte: FCA Brasil, 2017

A estrutura da caçamba, isolada, pode ser vista na Figura 25.

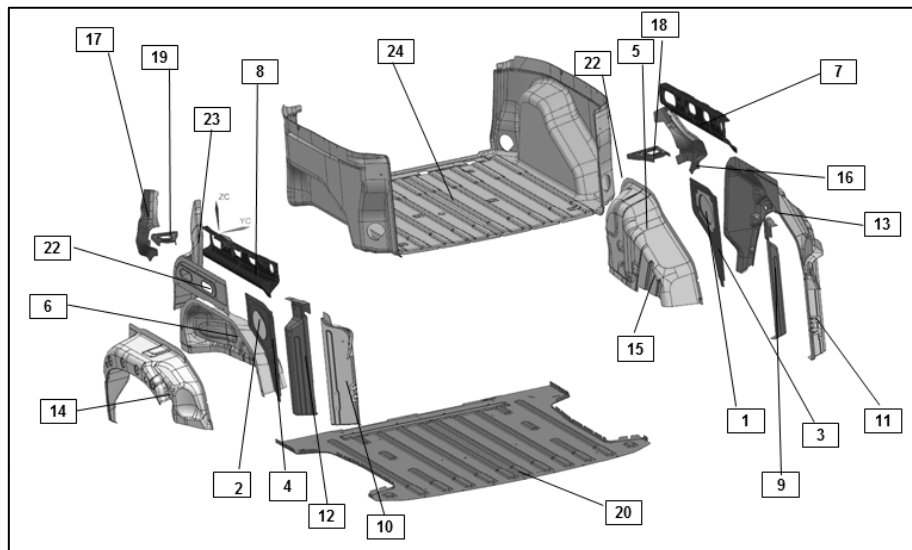
Figura 25: Componentes atuais da caçamba sem o restante da estrutura



Fonte: FCA Brasil, 2017

O detalhe das peças que compõem essa estrutura pode ser visto na Figura 26.

Figura 26: Componentes atuais em detalhe



Fonte: FCA Brasil, 2017

Nesta figura, é possível notar que a estrutura da caçamba é composta por 24 partes. 23 dessas partes são feitas de aço, com espessuras que variam de peça para peça, um desses componentes é feito de polipropileno (protetor de caçamba, identificado na figura como componente número 24).

Esses componentes possuem uma massa total de 48,2, como pode ser visto na

Tabela 4:

Tabela 4: massa dos componentes da estrutura atual da caçamba

| Parte | Massa (kg) | Parte | Massa (kg) |
|--------------|-------------------|--------------|-------------------|
| 1 | 0,07 | 13 | 2,45 |
| 2 | 0,07 | 14 | 2,13 |
| 3 | 0,47 | 15 | 0,92 |
| 4 | 0,47 | 16 | 0,92 |
| 5 | 3,74 | 17 | 0,92 |
| 6 | 3,06 | 18 | 0,23 |
| 7 | 1,8 | 19 | 0,23 |
| 8 | 1,8 | 20 | 11,83 |
| 9 | 1,06 | 21 | 0,57 |
| 10 | 1,06 | 22 | 1,23 |
| 11 | 1,35 | 23 | 1,23 |
| 12 | 1,35 | 24 | 9,17 |
| | | Total | 48,2 |

Fonte: FCA Brasil, 2017

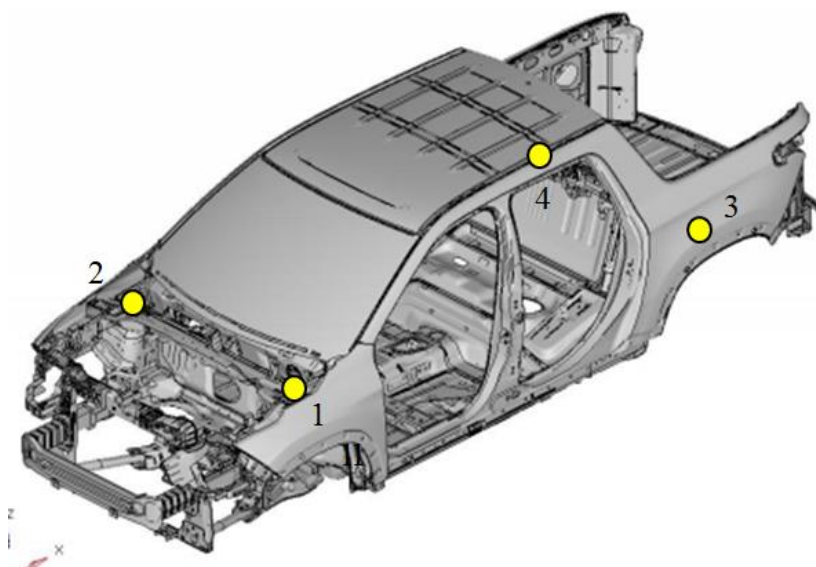
Observa-se que somente o protetor de caçamba adiciona uma massa de aproximadamente 9kg a estrutura. No caso de a caçamba ser feita de material compósito, este protetor se torna desnecessário, pois sua função é proteger o metal da abrasão e conferir acabamento estético. O material compósito já possui alta resistência a abrasão e pode ser processado já com o acabamento necessário.

4.1 AVALIAÇÃO EM TEMPERATURA AMBIENTE

Inicialmente, os testes virtuais serão efetuados sobre o modelo da configuração original do veículo em análise. Como estabelecido pela metodologia, o primeiro teste a ser efetuado é aquele de rigidez à torção. Esse teste é feito de acordo esquema apresentado na Figura 21.

A rigidez é calculada utilizando-se a equação (5859), baseado nos deslocamentos dos pontos 1, 2, 3 e 4 da Figura 27.

Figura 27: Pontos de medição de deslocamento no teste de rigidez a torção



Fonte: FCA Brasil, 2017

Os testes são feitos da seguinte maneira: o aço das peças da caçamba é substituído, em um componente por vez, por PA66 40%, e a rigidez a torção é calculada uma vez para cada possibilidade de peça feita polímero reforçado. O intuito de realizar vários cálculos de torção é identificar em qual região a troca de material seria mais crítica para o comportamento global do veículo. Em seguida todas os componentes são substituídos ao mesmo tempo e a torção é reavaliada, para que se tenha uma melhor previsão de como o veículo se comportaria quando sua caçamba fosse feita em PA66 40%. Um resultado muito danoso à rigidez do veículo pode inutilizar o projeto já nesta etapa.

As partes, quando simuladas em PA66 40% g. f., têm espessura de 3mm. Essa espessura, quando se trata de polímeros reforçados por fibra longa, é considerada ótima por minimizar problemas de rechupe e de quebra das fibras, evitando a degradação das propriedades do material. (HOPE e VIETOR, 2014)

O efeito de cada parte no comportamento global do veículo é mostrado na Figura 28.

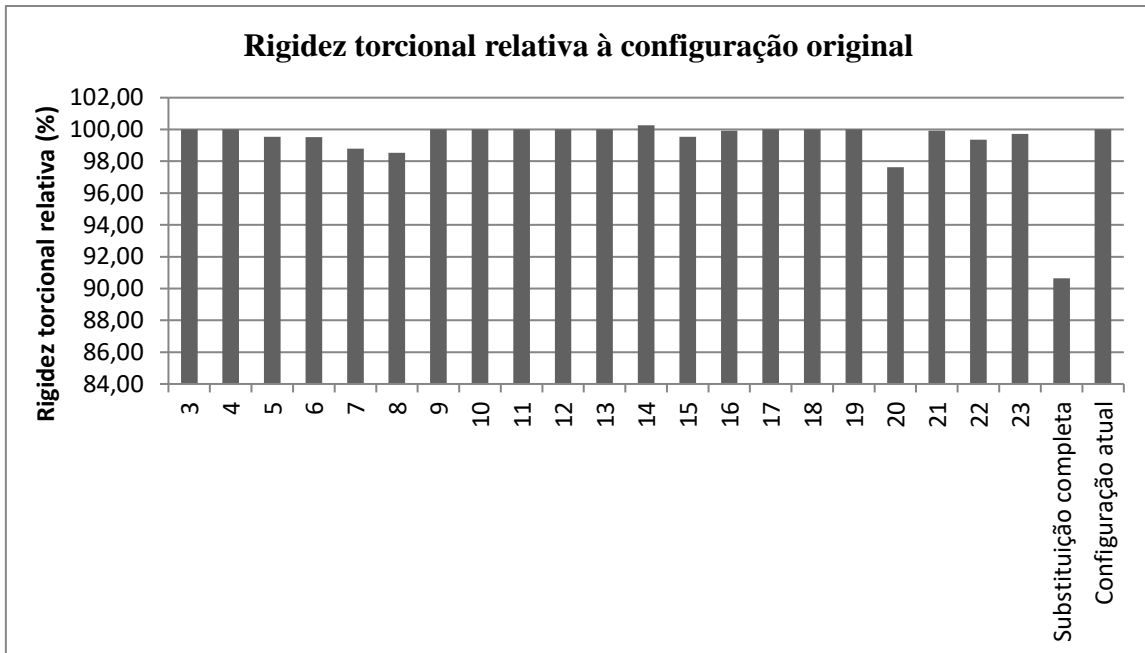


Figura 28: Resultado da avaliação de sensibilidade dos componentes em relação a troca de material

Pelo diagrama, pode-se perceber que, individualmente, as peças podem ocasionar em uma queda de até aproximadamente 2,3% na rigidez a torção global do veículo. No caso de todas as peças serem substituídas ao mesmo tempo por PA66 40% g. f., a queda na rigidez seria de cerca de 10%. No caso da nova caçamba, com outras partes projetadas, apresentar uma rigidez muito baixa, as regiões onde estão as peças 5, 6, 7, 8, 10, 15, 22 e 23 podem ser reforçadas com nervuras para que se obtenha um desempenho melhor.

O teste de rigidez a flexão segue o esquema da Figura 21 e é calculada utilizando a equação (59), com base nos deslocamentos apresentados nos pontos da Figura 29.

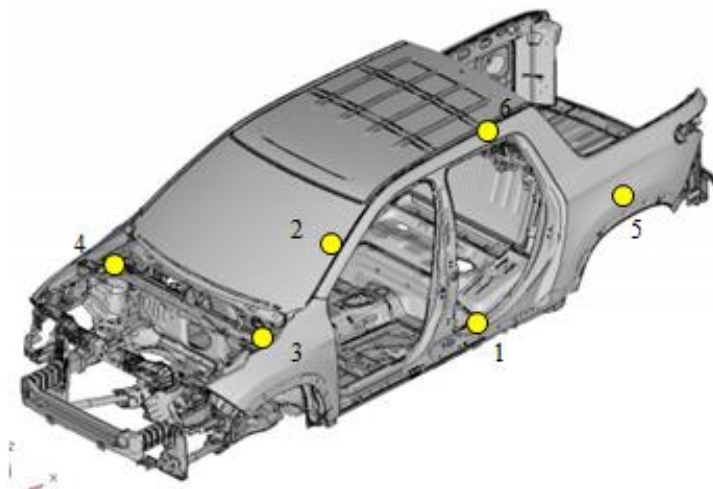


Figura 29: Pontos de medição de deslocamento no teste de rigidez a flexão

Foi realizado o mesmo procedimento do teste virtual de rigidez a torção, ou seja, a sensibilidade da rigidez à flexão é avaliada primeiramente em relação a cada componente, depois é feita uma avaliação com todos os componentes constituídos por material polimérico reforçado. Os resultados podem ser verificados na Figura 30.

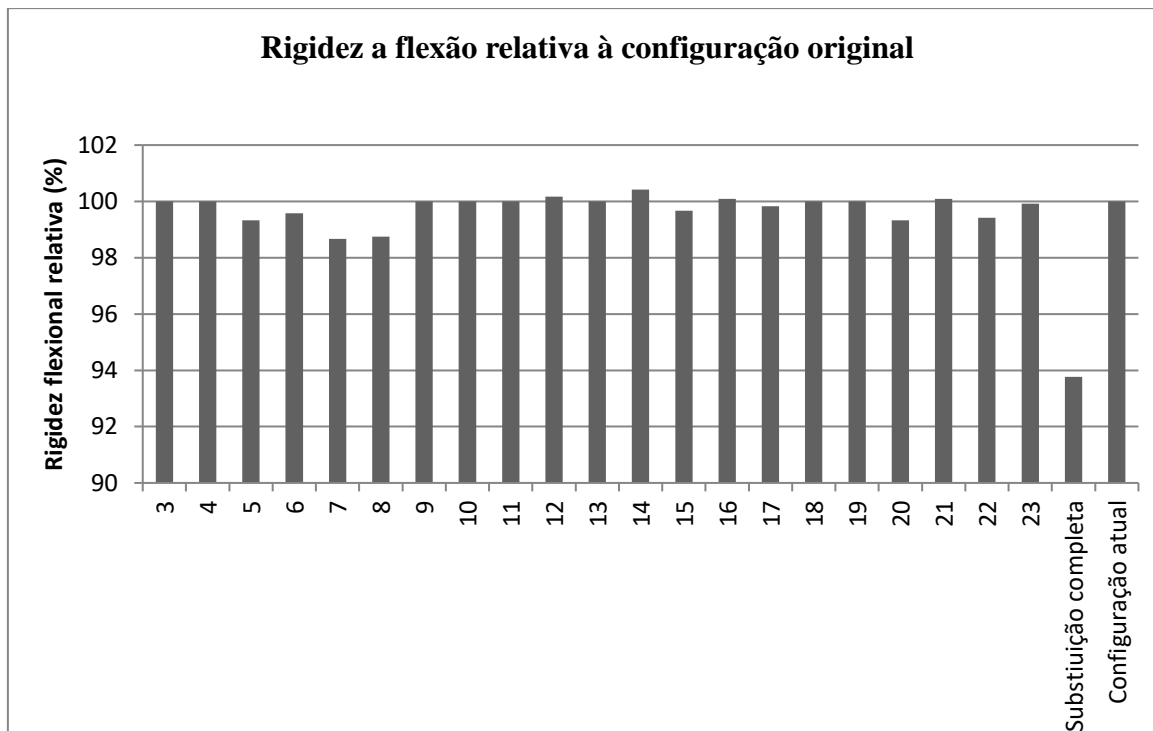


Figura 30: Resultado da avaliação de sensibilidade dos componentes em relação a troca de material

É possível constatar que as regiões onde ficam os componentes 5, 6, 7, 8, 15, 20 e 22 são as regiões mais críticas para a rigidez à flexão quando o material metálico é substituído por PA66 40%. Quando todos os componentes são alterados ao mesmo tempo, tem-se uma queda de 6,2% na rigidez a flexão global.

Prosseguindo com os testes virtuais preliminares antes do projeto de novos componentes, é feita uma análise modal do veículo, no intuito de se identificar outros locais de baixa rigidez. A análise é efetuada mediante uma simulação de vibrações livre-livre que vão de 0 a 110Hz, o que é considerada uma faixa bem representativa do trabalho ao qual o veículo é submetido. Como resultado, pôde-se identificar 3 valores de frequência nos quais pode-se observar características de ressonância, sendo elas 93, 98 e 107Hz. Os resultados das análises estão representados na Figura 30, Figura 32 e Figura 33.

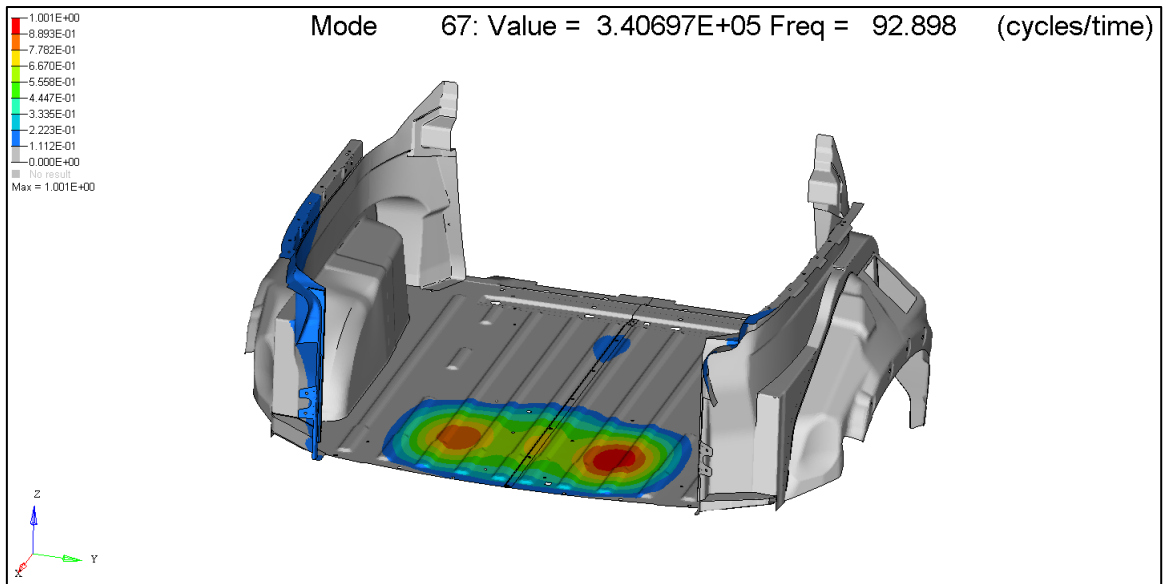


Figura 31: Análise modal da caçamba. Regiões críticas a 93 Hz

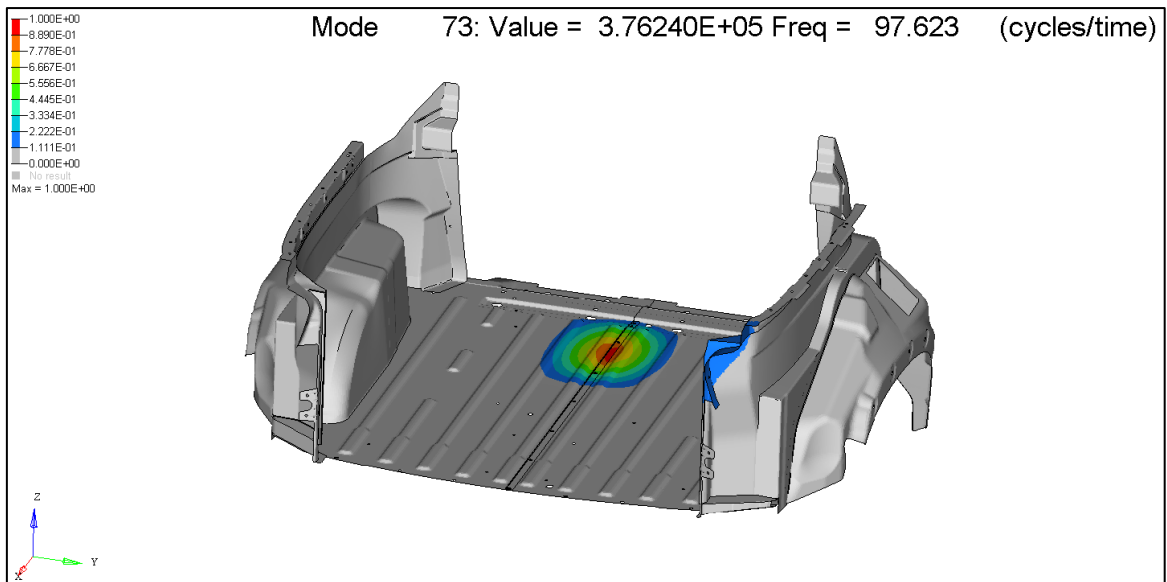


Figura 32: Análise modal da caçamba. Regiões críticas a 98 Hz

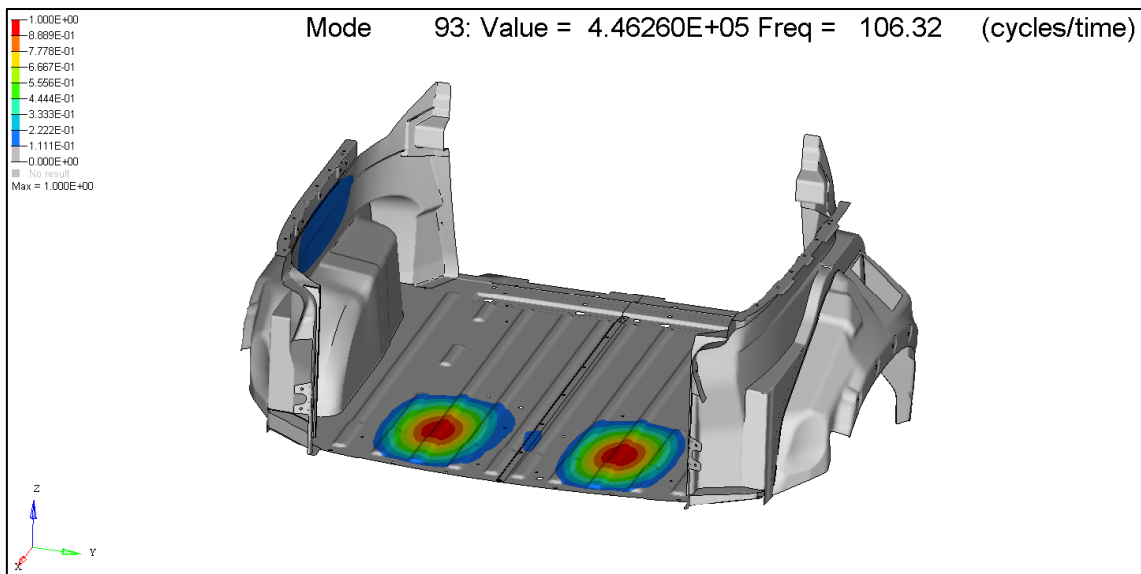


Figura 33: Análise modal da caçamba. Regiões críticas a 106 Hz

Identificadas as regiões onde a rigidez local possa apresentar algum problema de desempenho, são então efetuados testes para verificar o desempenho destas regiões. Os testes, como já descrito, consistem em aplicar um disco rígido de 250mm na região a uma força de 2500N e determinar qual é o deslocamento máximo devido a aplicação desta força. As regiões onde o disco é aplicado estão esquematizadas na Figura 34.

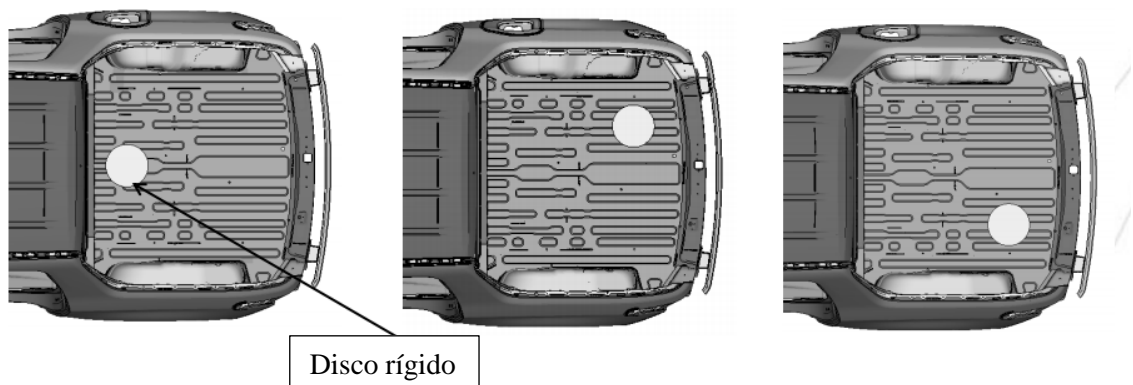


Figura 34: Regiões de aplicação da força na análise localizada de rigidez

Esse teste é aplicado somente ao pavimento da caçamba devido aos resultados obtidos na análise modal. Para o ensaio, o pavimento tem, como nos testes anteriores, seu material alterado de aço para PA66 50% g. f. e sua espessura estipulada como sendo de 3mm. Os resultados de deslocamento máximo obtidos são resumidos na Tabela 5.

Tabela 5: Deslocamento máximo das regiões onde é aplicado o teste de rigidez localizada

| Posição | Deslocamento máximo (mm) | |
|----------------|---------------------------------|-----------------------------|
| | Pavimento em aço | Pavimento em PA66 40% g. f. |
| 1 | 11,97 | 7,13 |
| 2 | 6,95 | 2,86 |
| 3 | 6,14 | 2,64 |

Como é possível notar, o deslocamento máximo do pavimento feito de polímero reforçado é menor do que aquele observado no pavimento em aço, melhorando, neste caso, a sua performance no que diz respeito a rigidez local.

Feitas essas análises, pode-se agora reprojeter essas partes no sentido de obter mais vantagens do processo de fabricação a ser utilizado. Na conformação de metais, as possibilidades de design são mais limitadas, o que força a estrutura a ser menos eficiente, com muitas partes e com formatos nem sempre ideais. Quando se processa um polímero por moldagem a injeção, tem-se a possibilidade de designs muito mais otimizados e formas mais complexas, possibilitando maior eficiência da estrutura.

Uma das formas na qual a eficiência é aumentada é reduzindo o número de partes da montagem. Isso leva, conseqüentemente, a redução do número de operações, de operações, de soldas e de custo.

Como já explicado, o projeto de componentes envolve uma atividade muito complexa, que foge do escopo desse trabalho. O projeto, aqui, será apenas básico. No entanto, apesar de preliminar, o projeto das partes será feito de modo a respeitar alguns requisitos importantes para a viabilidade de sua fabricação, como ângulo de extração, espessura e tamanho das partes. Procura-se, dentro dessas limitações, reduzir o número de partes o máximo possível.

Tendo essas considerações em vista, o novo arranjo de peças é elaborado e ilustrado na Figura 35.

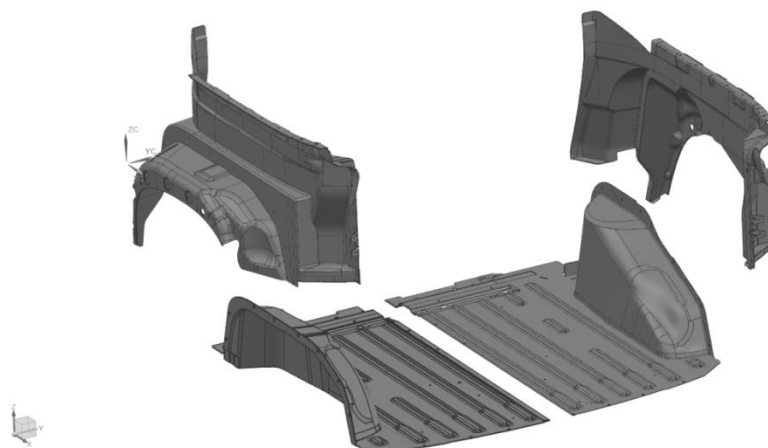


Figura 35: Partes em PA66 40% f. v.

Essas partes tem uma espessura de 3mm. Apesar de ser um valor maior do que aquele que as peças de metais possuem, de 0,7 a 1mm, a densidade muito mais baixa do polímero confere ao arranjo uma redução de peso em relação à estrutura original. A estimativa de massa dos componentes da figura anterior pode ser verificada na Tabela 6.

Tabela 6: Peso dos componentes em PA66 0% f. v.

| Parte | Massa (kg) |
|----------------------------|-------------------|
| Painel lateral direito | 4,46 |
| Painel lateral esquerdo | 4,53 |
| Lado direito do pavimento | 6,09 |
| Lado esquerdo do pavimento | 5,88 |
| Total | 20,96 |

Com relação à montagem das peças ao restante do veículo, tentou-se manter as conexões o mais próximo possível do que era quando as partes eram de metal, assim é possível analisar de forma mais isolada o efeito da troca de material. Deve-se manter em mente que, como todos os testes são virtuais, a manutenção das conexões implica utilizar os mesmos elementos onde é possível. Isso quer dizer que, entre a estrutura modificada e o resto do veículo, onde era adesivo, procurou-se manter o adesivo, onde haviam elementos rígidos, procurou-se manter esses e assim por diante. As conexões que estavam entre peças que foram agregadas uma à outra foram eliminadas, pois essas peças, antes conectadas, agora são a mesma peça.

Elaborado o novo arranjo de partes e conectado à estrutura do restante do veículo, os testes de rigidez a torção e flexão, já realizados, são refeitos. Para o teste de rigidez a torção, tem-se o resultado exibido na Figura 36:

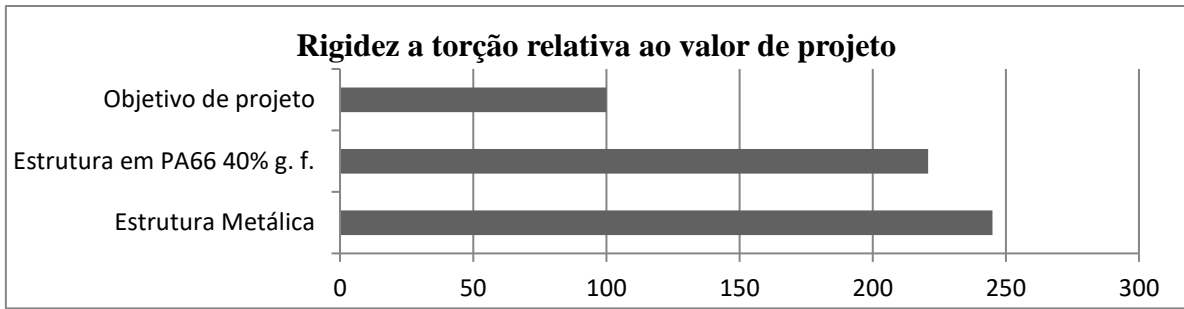


Figura 36: Valores de rigidez a torção calculados

Pode-se ver pela figura que a rigidez a torção da configuração com polímero compósito caiu aproximadamente com relação ao valor da estrutura em aço. Apesar dessa redução, o valor da rigidez ainda é mais de 100% maior do que o valor de projeto, o que torna a sua utilização uma possibilidade para a estrutura da caçamba.

Observando a Figura 37, percebe-se que as tensões equivalentes de Von Misses máximas na caçamba em poliamida são cerca de 6 vezes menores do que aquelas que são encontradas na caçamba metálica. Isso se deve a sua maior espessura e, devido a integração de partes, a menor quantidade de pontos de concentração de tensão, como aqueles encontrados em locais onde há conexões com outras peças. Os valores na figura estão multiplicados por um fator de 3 por questões de visualização, ou seja, a tensão máxima da caçamba em PA66 é de aproximadamente 14,1MPa. Considerando que, devido à característica frágil do polímero em questão, sua tensão de escoamento seja a mesma de resistência a tração, ou seja, 215MPa a 23°C, podemos dizer que a tensão máxima na caçamba, quando submetida ao teste virtual de rigidez a torção, é menor do que 7% de sua capacidade.

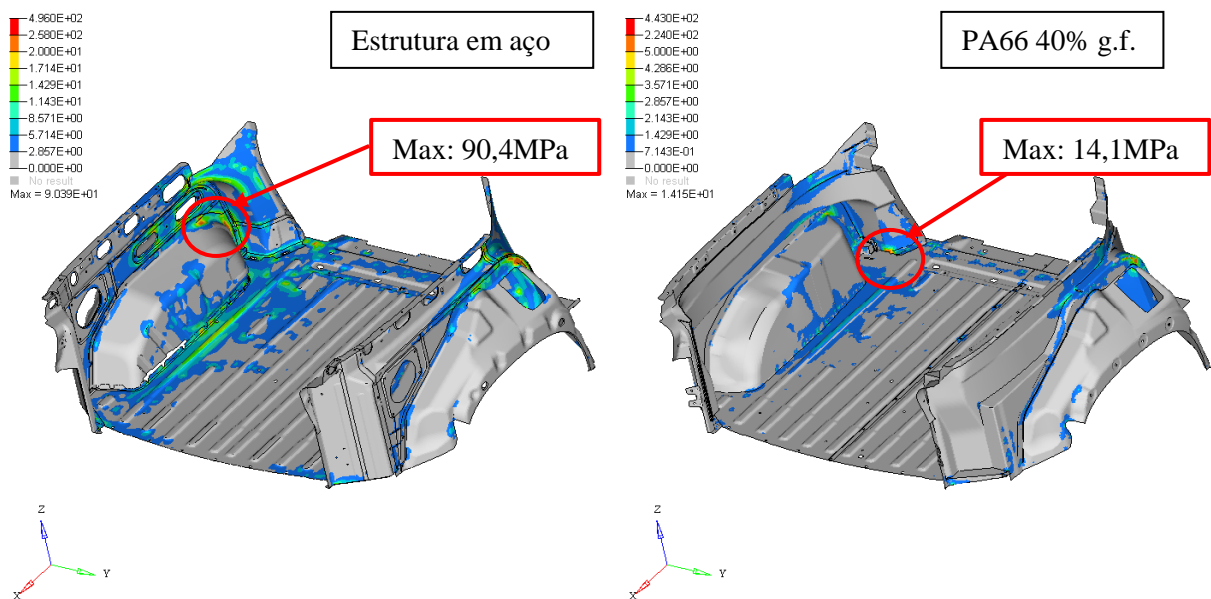


Figura 37: Tensões máximas no teste de rigidez a torção

Na Figura 38, verifica-se o efeito nos componentes não modificados no carro. Pode-se perceber que o restante não é significativamente afetado pela adoção de polímero reforçado como material constituinte da caçamba. Ao contrário, há uma pequena melhoria no que se refere a tensão máxima, com uma redução de cerca de 4,5% desta.

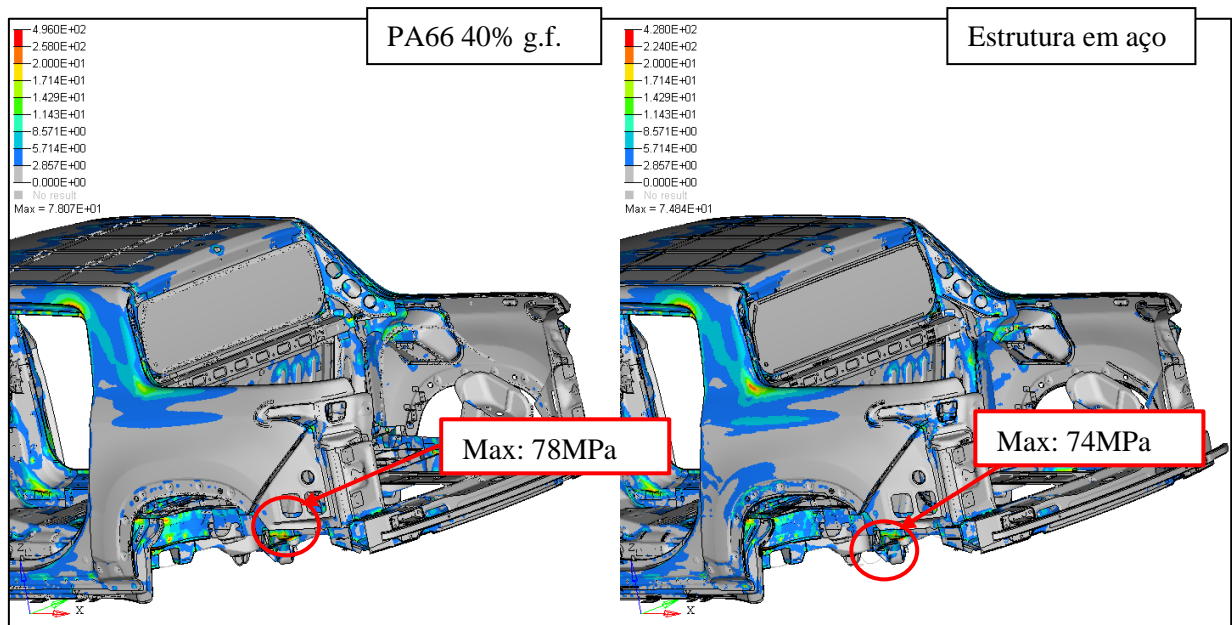


Figura 38: Tensões máximas no teste de rigidez a torção na parte não modificada do veículo

Já para o teste de rigidez a flexão, tem-se o resultado da Figura 39:

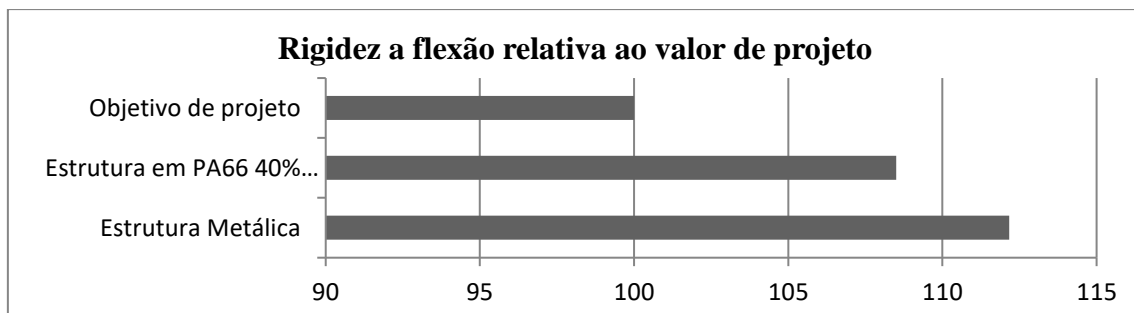


Figura 39: Valores de rigidez a flexão calculados

Assim como no teste de rigidez a torção, a rigidez a flexão do veículo, quando é utilizada a caçamba de PA66 reforçado, fica em um valor acima do valor de projeto, em cerca de 8%. Em relação à estrutura original em aço, há uma redução de aproximadamente 3% da rigidez.

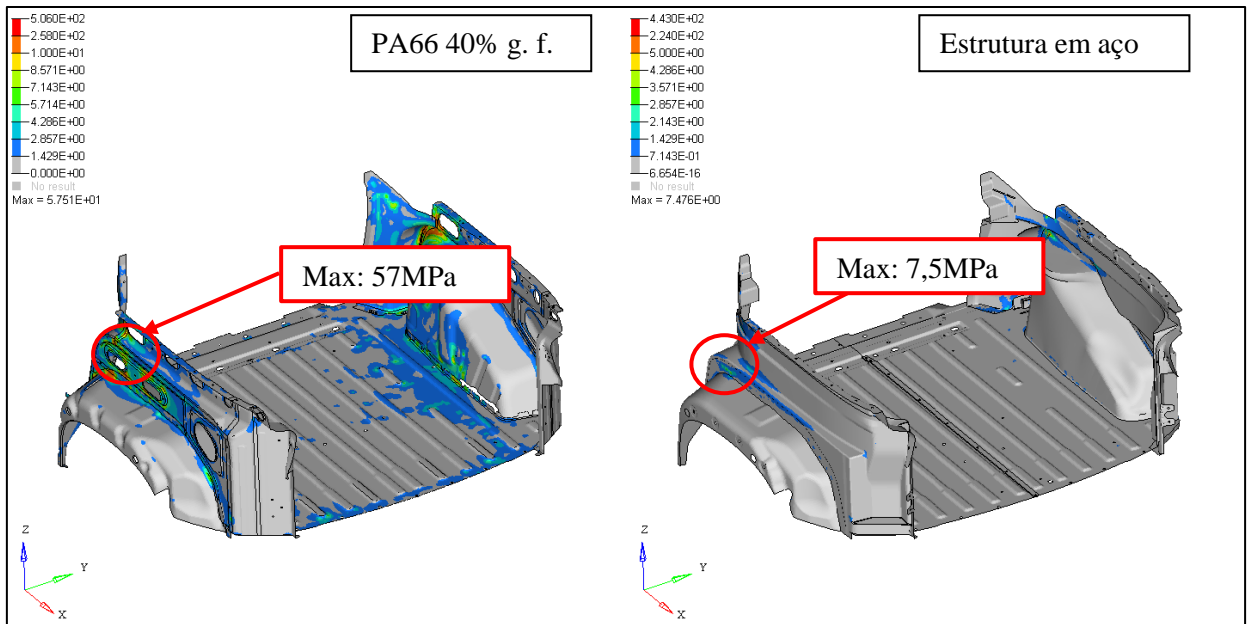


Figura 40: Tensões máximas no teste de rigidez a flexão

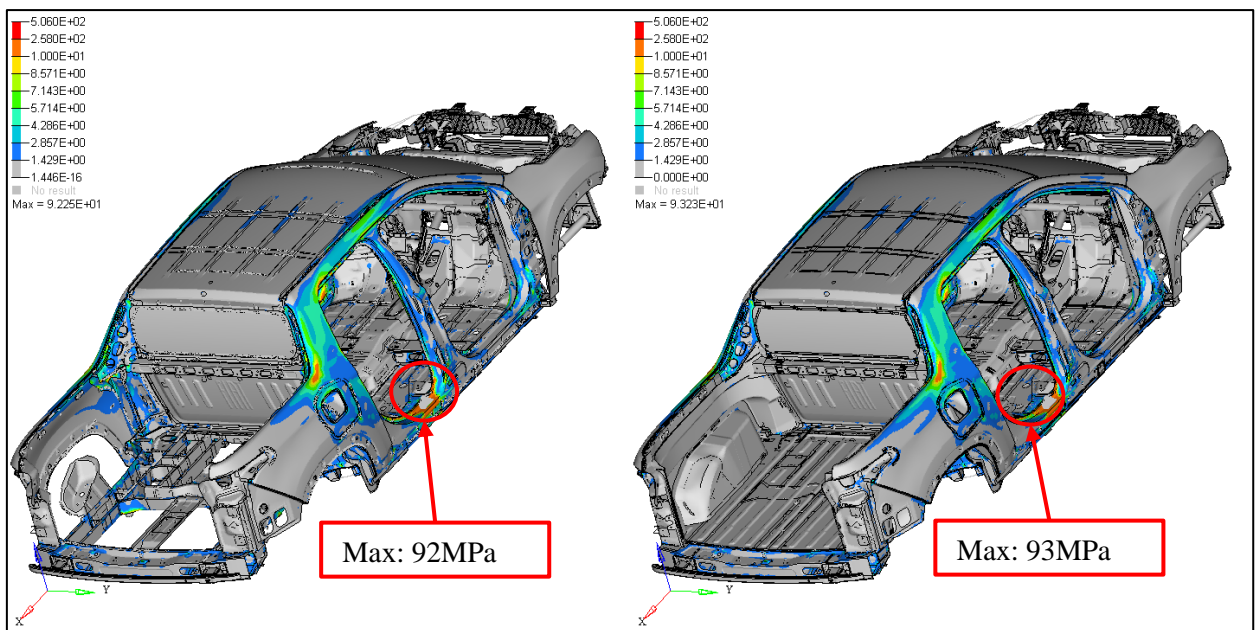


Figura 41: Tensões máximas no teste de rigidez a flexão nas partes não modificadas do veículo

4.2 AVALIAÇÃO EM ALTA TEMPERATURA

Para que o estudo do potencial do uso do polímero reforçado PA66 como elemento estrutural seja mais conclusivo, é necessário que as avaliações sejam feitas em condições ambientais mais críticas, pois estas podem afetar o desempenho do polímero. No caso estudado neste trabalho as condições ambientais são muito importantes devido a exposição do componente em questão. O

PA66 tem a sua rigidez alterada com a mudança de temperatura. Abaixo, tem-se a curva de tração deformação de alguns corpos de prova de PA66 40% testados a temperaturas mais elevadas.

Vê-se que a rigidez é significativamente afetada, visto que a inclinação da curva decresce com o aumento da temperatura. Dessa forma, faz-se necessário avaliar se o veículo ainda atinge os objetivos de performance quando a temperatura dos componentes está elevada.

Para que isso feito, primeiro é necessário calcular-se qual a temperatura crítica desses componentes. Sabe-se que a os ensaios realizados na câmara de fadiga termo vibracional (FTV) nas dependências da FCA são realizados de forma a simular as condições mais críticas de ambiente. Nesta câmara, painéis solares são posicionados acima do veículo, emitindo uma radiação de Q' sobre o veículo. Ao mesmo tempo, a temperatura do ambiente é mantida constante a T_{amb} graus.

Baseado nessas propriedades ambientais, as equações de transferência de calor por condução, radiação e convecção, são utilizadas com o fim de se estimar a temperatura da caçamba de um veículo atual quando este é ensaiado na câmara de FTV. O uso dessas equações será validado com os dados obtidos no próprio ensaio físico. Uma vez validadas, essas equações serão utilizadas para determinar-se a temperatura em que as peças de PA66 40% operariam em condições ambientais críticas e os ensaios virtuais anteriores serão refeitos com essa temperatura.

A temperatura será calculada no pavimento do veículo, por ser a parte mais exposta a radiação solar, e seu valor será aplicado a todos os componentes da caçamba. A estrutura tradicional do pavimento da caçamba é composta por uma placa de metal e um protetor plástico. Na Figura 42, a superfície 1 é a superfície superior do protetor da caçamba, em contato direto com o ar. Já a superfície 2 é o contato da superfície inferior do protetor de caçamba com a superfície superior do painel metálico. A superfície 3 é a superfície inferior do painel metálico, em contato direto com o ar embaixo do veículo.

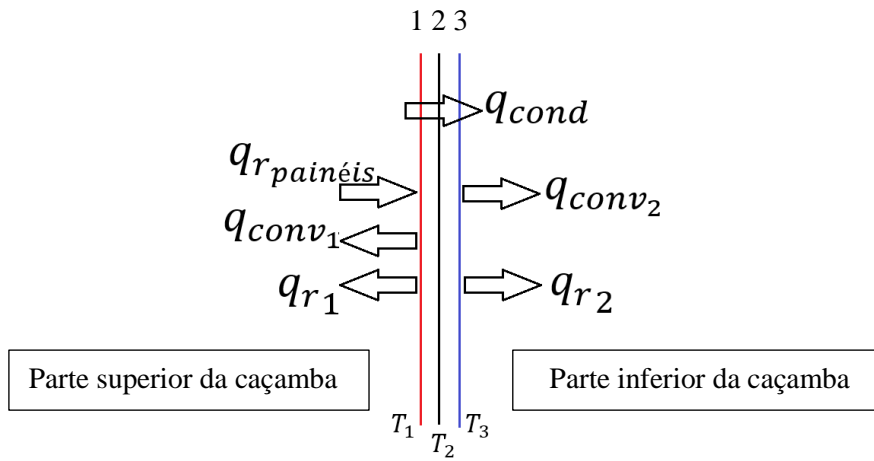


Figura 42 . Esquema da troca de calor nas superfícies da caçamba em PA66 40% f. v.

Na superfície 1, considera-se que haja transmissão de calor por radiação dos painéis solares para o protetor de caçamba e do protetor de caçamba para as paredes do ambiente. Considera-se também que haja transmissão por convecção livre para o ar da câmara. Na superfície 2, considera-se que haja condução do protetor de caçamba para o painel metálico e na superfície 3, leva-se em conta a troca de calor com o ambiente por convecção livre e por radiação com as paredes do ambiente.

O fluxo de calor é considerado em estado transiente e o pavimento é considerado uma parede plana. Também se parte do fato que o fluxo é unidirecional, da superfície do protetor de caçamba para a parte inferior do painel metálico do pavimento. As equações de fluxo de calor por condução, convecção e radiação utilizadas são as equações (60), (58) e (59).

Aplicando nas superfícies 1, 2 e 3 da Figura 42, o conceito de resistências abordado na referência fica da seguinte forma:

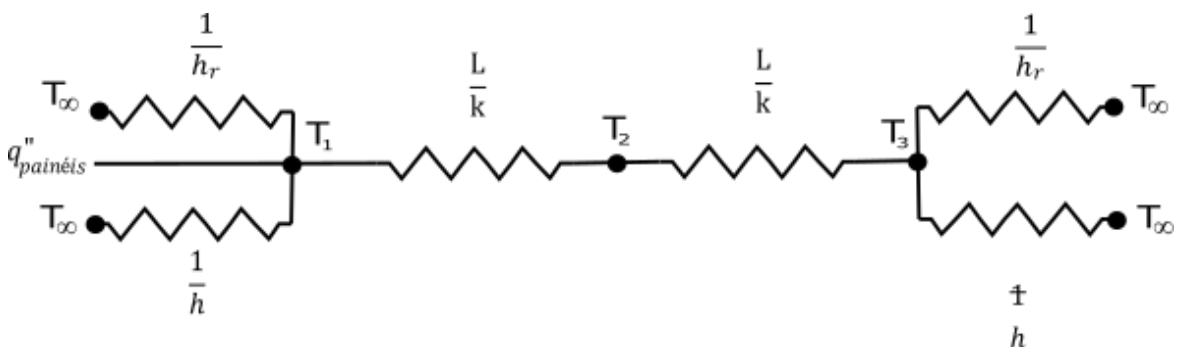


Figura 43. Conceito de resistência aplicado nas superfícies do pavimento da caçamba tradicional

Na Figura 43, h_r vale:

$$h_r = F_{ij}\sigma(T_1 + T_w)(T_1^2 - T_w^2)$$

Assim, as equações de condução, convecção e radiação, são aplicadas as superfícies do pavimento da caçamba, resultando no seguinte sistema:

$$q''_{r_{painéis}} - h_r(T_1 - T_\infty) - F_{ij}\sigma(T_1^4 - T_w^4) - \frac{k_1}{L}(T_1 - T_2) = 0 \quad (63)$$

$$\frac{k_1}{L}(T_1 - T_2) + \frac{k_2}{L}(T_2 - T_3) = 0 \quad (64)$$

$$\frac{k_2}{L}(T_2 - T_3) - h_r(T_3 - T_\infty) - F_{ij}\sigma(T_3^4 - T_w^4) = 0 \quad (65)$$

Resolvendo essas equações, determinou-se que a temperatura da caçamba tradicional calculada é de 90,6°C. Essa temperatura não pode ser verificada na prática por questões de disponibilidade da câmara de FTV. Contudo, esse resultado é considerado coerente com base nas normas internas que estabelecem condições críticas para os testes do veículo. A norma interna que cobre procedimentos e testes de componentes externos termoplásticos e termofixos em geral prevê que a temperatura da caçamba seja de 80°C no caso do teste de estabilidade dimensional e de 90°C no teste de choque de calor. A temperatura calculada 88,5°C. Já a norma que cobre especificamente os protetores de caçamba em plástico, diz que o teste da performance da peça em temperaturas extremas deve chegar a 85°C. em estudos já realizados nesse assunto aponta-se que que em situações críticas as temperaturas nos componentes externos de um veículo podem ser superiores a 80°C (REZENDE, 2010). Essas diferenças estão dentro do limite aceitável para que as equações sejam consideradas válidas, e por isso essas mesmas equações são utilizadas para o cálculo da temperatura da caçamba em estudo quando em condições ambientais críticas, necessário devido a perda de performance dos polímeros quando em alta temperatura.

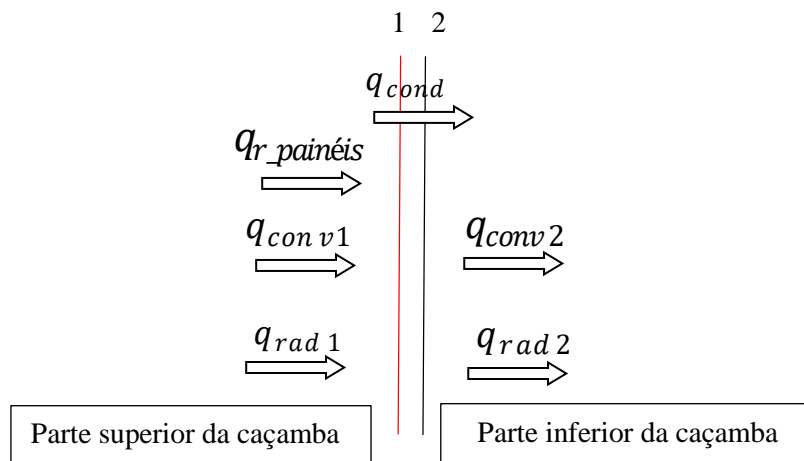


Figura 44. Esquema da troca de calor nas superfícies da caçamba em PA66 40% f. v.

A diferença do esquema apresentado na Figura 44 para aquele na Figura 42 é que no primeiro caso tem-se o painel metálico, enquanto na segundo existe somente a estrutura em polímero, o que elimina uma interface. O esquema de transferência de calor representado em termos de resistências é mostrado na Figura 45. Nota-se que um mecanismo de condução foi eliminado com a eliminação do painel metálico.

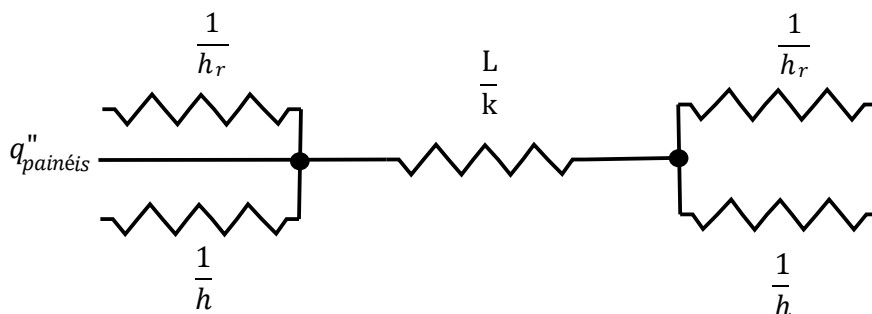


Figura 45: Conceito de resistência aplicado nas superfícies do pavimento da caçamba em PA66 40% f. v.

As equações utilizadas para o cálculo da temperatura em PA66 40% são as equações de (58) a (60). Utilizando-as, chega-se que a temperatura a ser considerada para a caçamba em PA66 40% é de 88,5°C. Os resultados atingidos com o uso das equações de transmissão de calor são resumidos na Tabela 7

Tabela 7: Temperaturas calculadas pelas equações de transferência de calor

| Temperatura crítica | |
|-----------------------|--------|
| Estrutura tradicional | 91°C |
| Estrutura em PA66 40% | 88,5°C |

Calculada a temperatura, deve-se obter a curva de tensão por deformação que corresponde ao comportamento do Nylon quando este se encontra a 88,5°C. Primeiramente, testes de tensão por

deformação são realizados a 80°C em 5 corpos de prova de Nylon, os resultados são mostrados na Figura 46. Nela, é mostrada também a curva média do ensaio.

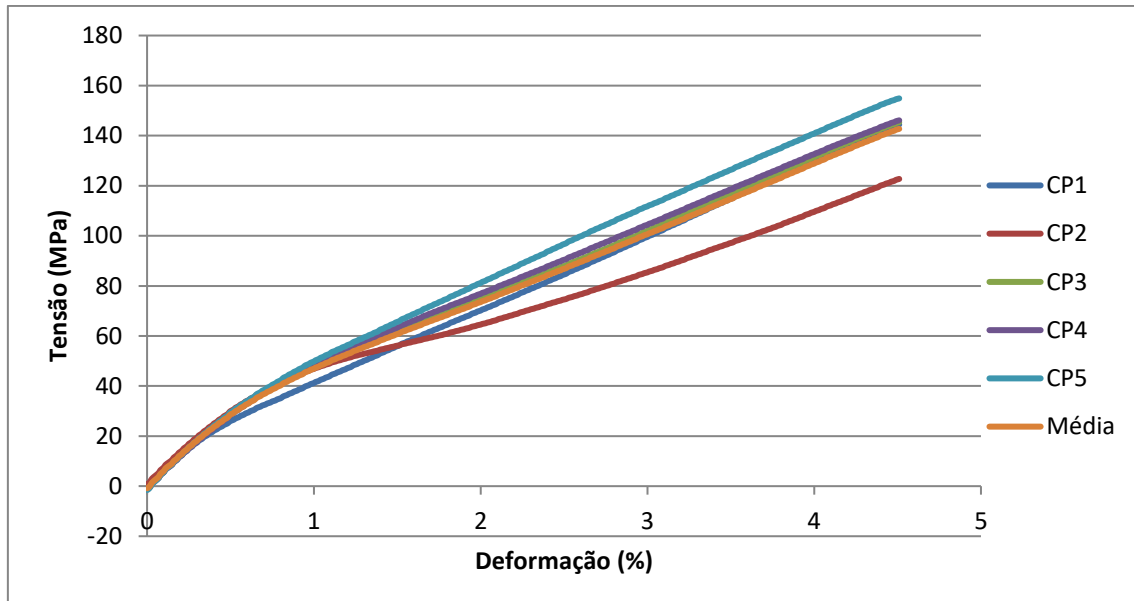


Figura 46: Curva de tensão x deformação do PA66 40% a 80°C

Também foram ensaiados 5 corpos de prova a 100°C. Os resultados e a curva média estão na Figura 47:

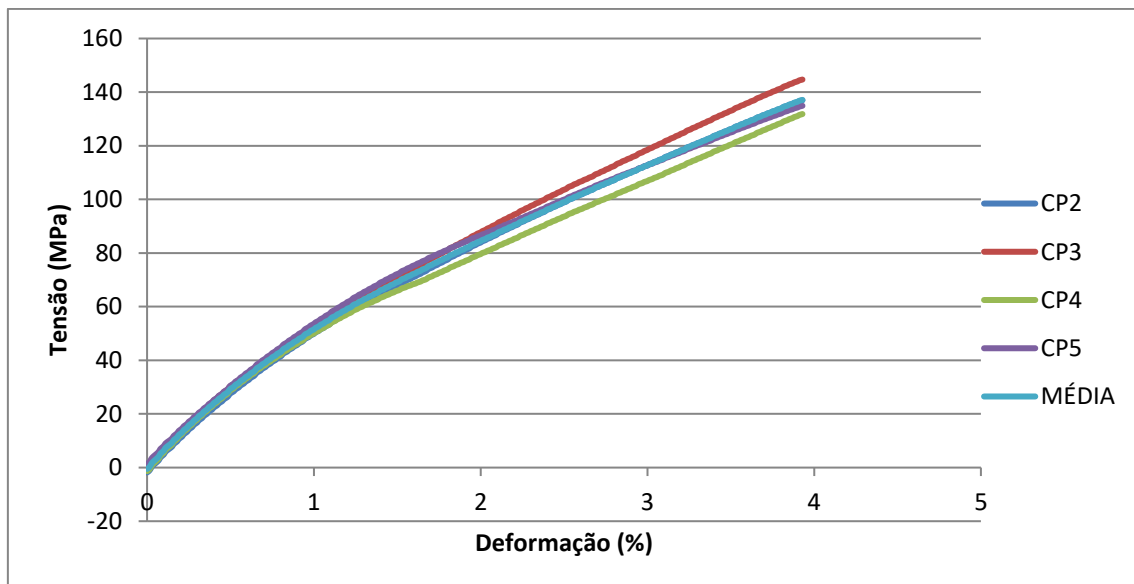


Figura 47: Curva de tensão x deformação do PA66 40% a 100°C

Na Figura 47, pode-se notar que foram utilizadas 4 curvas experimentais para o cálculo da média. Isso ocorre porque o teste no corpo de prova 1 não foi realizado corretamente e devido a existência de um número limitado de corpos de prova, o teste não pôde ser repetido. A partir das

curvas médias para 80°C e 100°C foi estimada a curva de material para 88,5°C, o que é ilustrado na Figura 48:

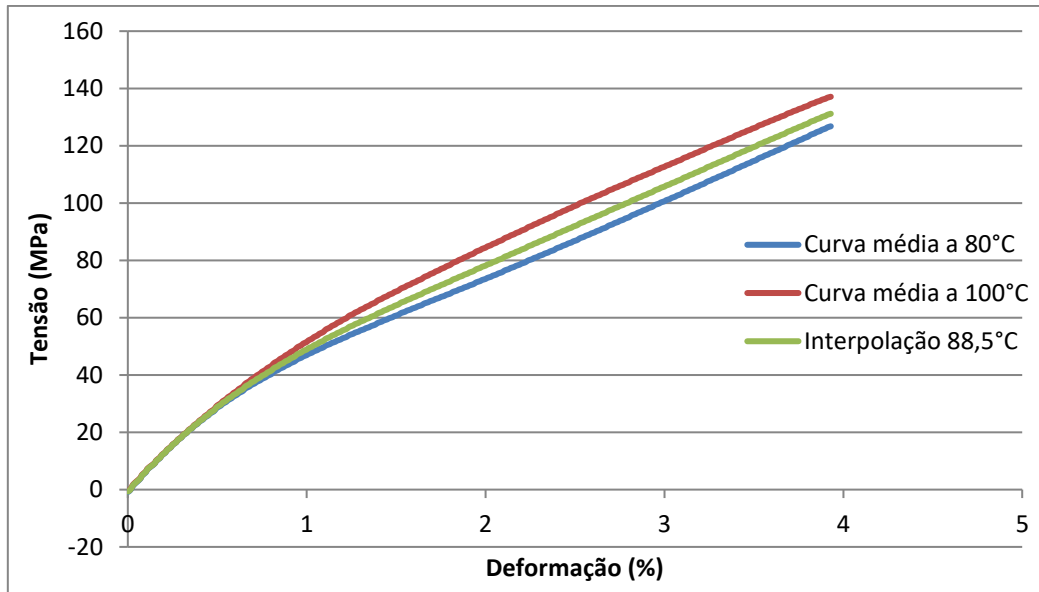


Figura 48: Interpolação para 88,5°C das curvas de 80°C e 100°C

A curva de interpolação é utilizada para alimentar a simulação não-linear, onde ocorrerá novamente os testes virtuais de torção e flexão.

Tendo sido esses testes realizados novamente, pode-se constatar, pela Figura 49 e Figura 50, que há uma degradação do desempenho da estrutura quando a temperatura do polímero está em um valor crítico.

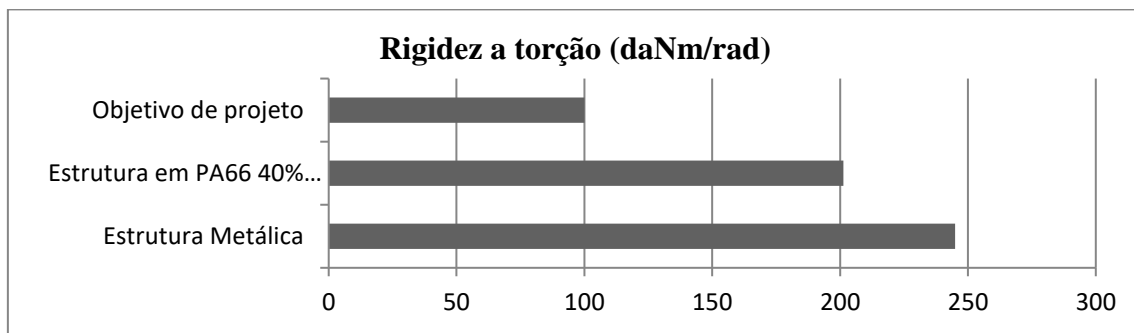


Figura 49: Rigidez a torção a 88,5°C

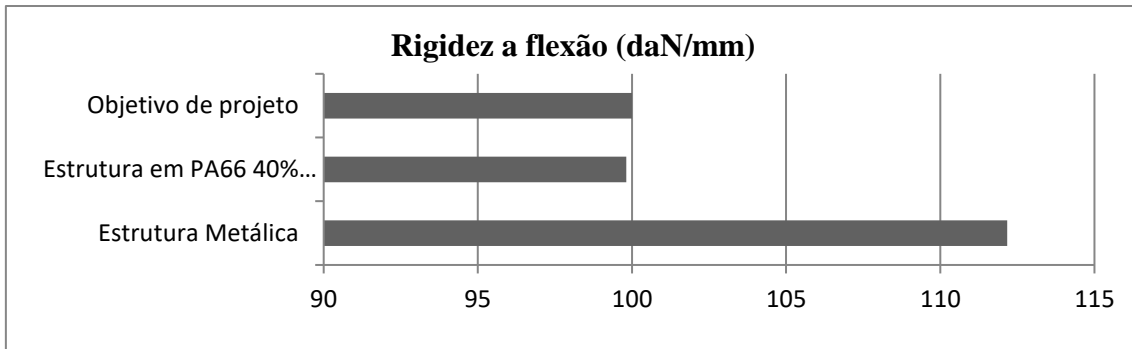


Figura 50: Rigidez a flexão a 88,5°C

Em relação à rigidez a torção, essa estava em 120% acima do objetivo de projeto, quando em temperatura ambiente, de acordo com a Figura 36. No entanto, quando as propriedades que são utilizadas para o PA66 são aquelas referente à temperatura de 88,5°C, essa rigidez se encontra 101% acima do valor de projeto, ainda bem acima do objetivo. Já para a rigidez a flexão, o valor cai para 99% do objetivo de projeto, quando antes era de 108%.

No material polimérico, considera-se como falha o ponto de escoamento, definido como o ponto onde se tem 0,2% de deformação plástica, como mostrado na Figura 51. Esse ponto equivale a uma tensão de 49MPa aplicada ao material. O módulo de elasticidade considerado para a construção da reta que determina o ponto de escoamento é de 6,1GPa, calculados do ponto 0 até o ponto onde se atinge 16Mpa na curva de interpolação.

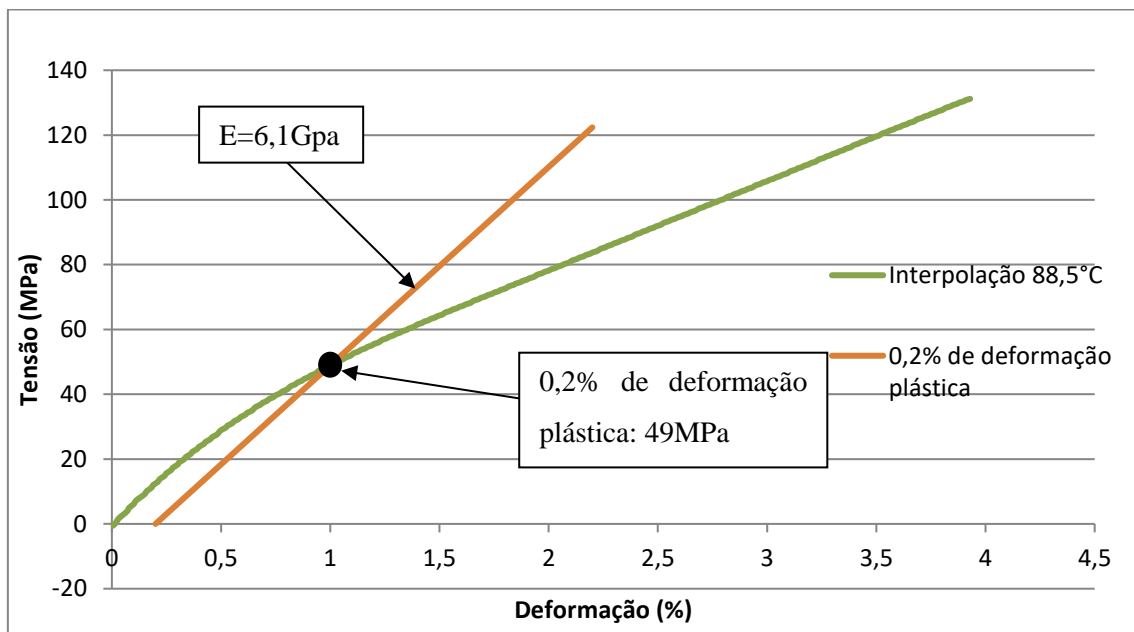


Figura 51: definição do limite de escoamento do PA66 40% a 88,5°C

Utilizando esse limite para o PA66 40% e o limite de 258MPa para o material metálico, temos o seguinte quadro de tensões, quando é realizado o teste virtual de rigidez a torção.

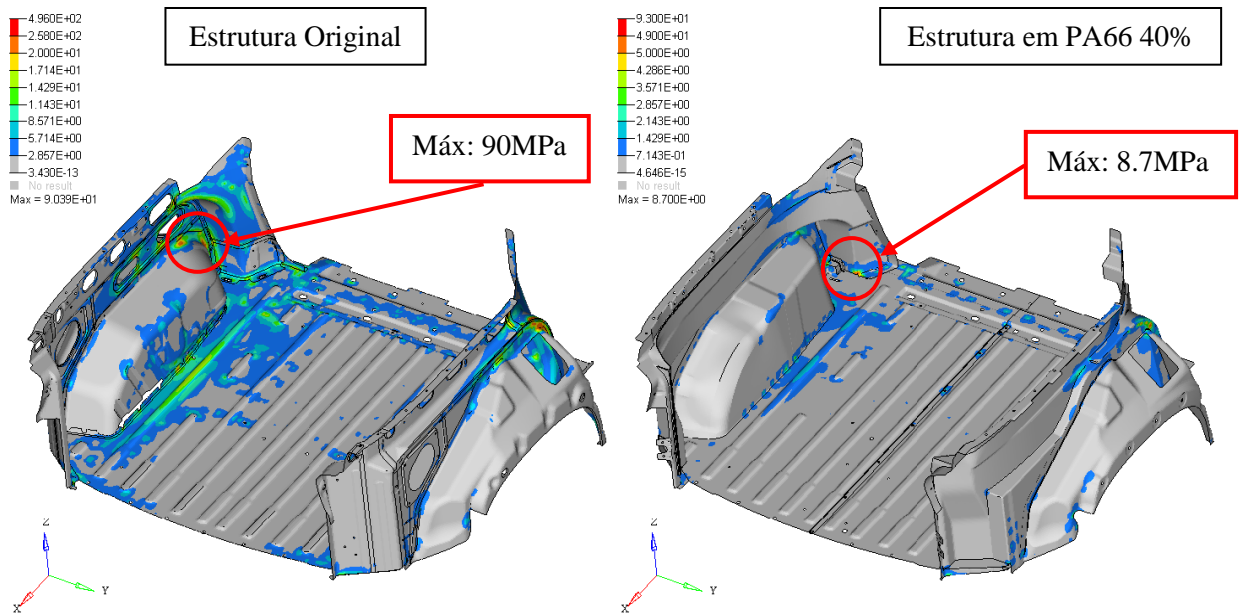


Figura 52: Tensões máximas no teste de rigidez a torção a 88,5°C

Vê-se pela Figura 52 que as tensões em ambas estruturas não atingem o valor na qual se tem a falha, como na simulação a temperatura ambiente. Observa-se que a tensão máxima na estrutura em compósito chega a 8,7 Mpa, 18 % do valor de sua falha, enquanto a estrutura em aço chega a 90 Mpa, 35 % do seu valor de escoamento. Observa-se que os valores encontrados na estrutura metálica são os mesmos encontrados anteriormente. Isso acontece porque a simulação com estrutura em aço utilizou os mesmos parâmetros, já que as propriedades desse metal são muito menos sensíveis á mudança de temperatura.

Já para o ensaio de rigidez a flexão, tem-se a seguinte situação, ilustrada na Figura 53:

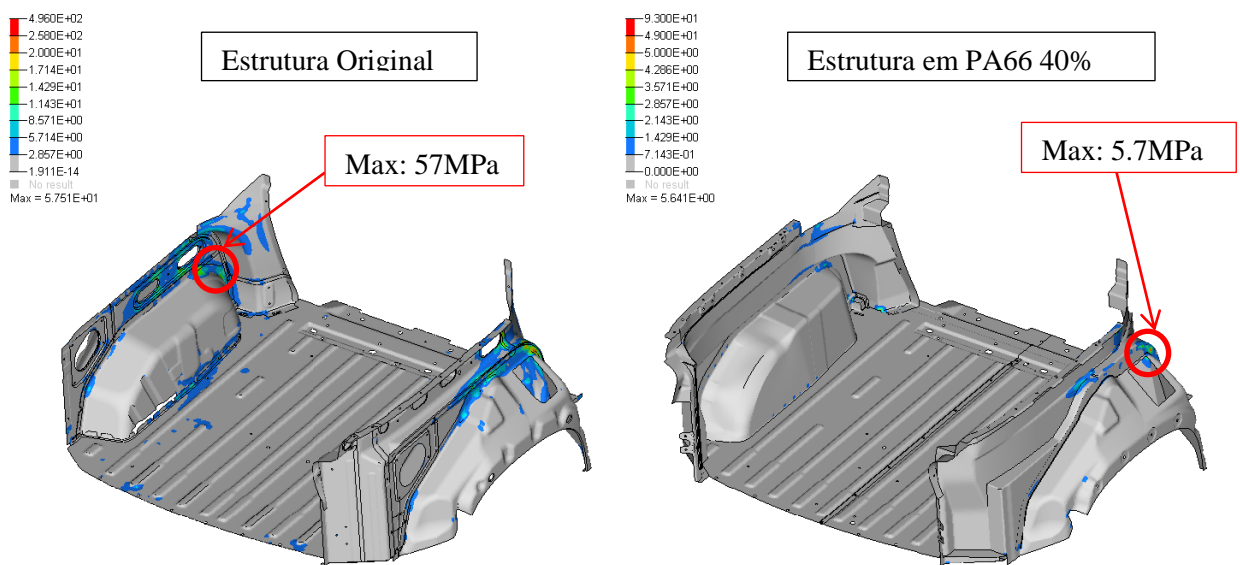


Figura 53: Tensões máximas no teste de rigidez a flexão a 88,5°C

Também nesse caso as tensões não ultrapassam o valor considerado como falha, para ambas as estruturas. No caso do compósito, a tensão máxima atingida é de 5,7 Mpa, 11% do valor considerado de falha. Já para o aço, como no caso calculado em temperatura ambiente, tem-se o valor máximo de 57Mpa, 22,1% do valor de escoamento.

5 CONCLUSÃO

No setor automotivo, a partir de 2009, uma série de regulamentações, que começaram pela União Européia e se espalharam por outras regiões que abrigam a grande indústria automotiva, fomentaram o desenvolvimento de veículos mais eficientes. No Brasil, esse papel foi levado adiante pelo programa Inovar-Auto. Entre todas as abordagens que se tomam para a fabricação de um veículo mais eficiente, uma delas é a de reduzir seu peso. Isso pode ser feito, por exemplo, mudando materiais de seus componentes para outros que sejam menos densos. Durante a elaboração deste trabalho de pesquisa. Observou-se que a substituição de metal por PA66 40% de fibra de vidro possibilitou uma redução de peso de 48,2kg para 21kg na estrutura, ou seja, uma redução em massa de 56%.

Um parâmetro importante no projeto veicular é a estimativa de rigidez à torção e a flexão. Para verificar a aplicabilidade do compósito de PA66 reforçado com fibra de vidro esses dois parâmetros foram analisados a luz do método de elementos finitos. O resultado, considerando que os veículos se encontram em temperatura ambiente, é uma redução de sua performance estrutural quando comparado à estrutura metálica tradicional. No entanto, os valores da rigidez torcional e flexional da estrutura em PA66 40% são superiores aos valores de projeto.

Como os veículos estão sujeitos a ação de radiação solar, o efeito da temperatura no compartimento de carga é outro parâmetro que deve ser levado em consideração. Para tal, novamente o método de elementos finitos foi utilizado. Nesse caso, o acoplamento do efeito e temperatura e mudanças nas propriedades mecânicas foi estudado. Utilizadas as equações na estrutura elaborada nesse trabalho, os testes virtuais de rigidez foram novamente aplicados e observou-se uma queda na performance dos componentes. O valor da rigidez a torção permaneceu acima do valor projeto, mas a rigidez a flexão ficou abaixo deste, indicando que o uso de PA66 em aplicações estruturais deve ser feito com cautela quando se tem a ocorrência de altas temperaturas.

Uma das sugestões para trabalhos futuros, é o estudo detalhado das conexões que os compósitos possam efetivamente ter com o restante do veículo, considerando detalhes de linha de montagem e fixações. Outro estudo, muito ligado ao primeiro, é o detalhamento das consequências que o novo material possa ter no custo do veículo. Também se sugere a realização de testes físicos para a validação do desempenho das partes em polímeros reforçados e a realização de testes de durabilidade, segurança veicular e ruído. Por último, pode ser estudado a otimização das geometrias em polímero compósito, tendo em vista a melhora do desempenho do veículo em termos de rigidez.

6 REFERÊNCIAS

ADEKOMAYA, O. et al. Negative impact from the application of natural fibers. **Journal of Cleaner Production**, 1 fevereiro 2017. 843-846.

AKINDOYO, J. O. et al. Polyurethane types, synthesis and applications a review. **RSC Advances**, 24 novembro 2016. 114453 -114482.

ALBRECHT, K. et al. Measuring fibre orientation in sisal fibre-reinforced, injection moulded polypropylene – Pros and cons of the experimental methods to validate injection moulding simulation. **Composites: Part A**, abril 2017. 54-64.

ALTAIR ENGINEERING INC. **HyperMesh Introduction: Pre-Processing for Finite Elements Analysis**. [S.l.]. 2014.

AMERICAN CHEMISTRY COUNCIL. **Plastics and Polymer Composites Technology Roadmap for Automotive Markets**, março 2014. Disponível em: <<https://plastics-car.com/Tomorrows-Automobiles/Plastics-and-Polymer-Composites-Technology-Roadmap/Plastics-and-Polymer-Composites-Technology-Roadmap-for-Automotive-Markets-Full-Report.pdf>>.

ASADI, A. et al. Lightweight sheet molding compound (SMC) composites containing cellulose nanocrystals. **Composite Structures**, 17 outubro 2016. 211-219.

BAUER, A. Long Fiber Injectio of Polyurethanes. **SAE Technical Paper Series**, 27 fevereiro 1997.

BEAUMONT, J. Plastic Part Design: To Use or not use Ribs - That is the question. **Plastics Engineering**, 2016. 36(6).

BELLOUL, N. et al. Effect of the Aggressive Environment on the Damage of a Glass Polyester Composite Developed by Hand Layup Process. **Advances in Materials Science and Engineering**, 24 março 2015.

BERGMAN, T. L. et al. **Fundamentals of Heat and Mass Transfer**. [S.l.]: John Wiley & Sons, Inc, 2011.

BEWLEY, L. Auto and electronics drive polycarbonate growth. **Chemical Week**, 20 fevereiro 2012. 23.

BIRON, M. **Thermoplastics and Thermoplastics Composites**. Oxford: Elsevier, 2013.

BLANCO, A. 30th Annual SPE Automotive Awards: 2001 Plastics Odyssey. **Plastics Engineering**, Dezembro 2000. 40.

CALIENDO, H. Lightweighting Technologies Highlight Automotive Composites Conference. **Plastics Technology**, 2015 Nov 2015. 12.

CALLISTER JR., W. D.; RETHWISH, D. G. **Materials Science and Engineering: an introduction**. [S.l.]: Wiley, 2014.

CAMPBELL, F. C. **Structural Composite Materials**. Ohio: ASM International, 2010.

CAMPILHO, R. D. S. G. **Natural Fiber Composites**. Boca Raton: CRC Press Taylor & Francis Group, 2016.

CHAPPELL, L. Honda Ridgeline forgoes steel for composite bed. **Automotive News**, 24 janeiro 2005. Disponível em: <<http://www.autonews.com/article/20050124/SUB/501240701/honda-ridgeline-forgoes-steel-for-composite-bed>>.

COMPOSITE pickup box. **Reinforced Plastics**, outubro 1999. 6.

CORREA, C. A. et al. Tenacidade à Fratura de Blendas PA 6/ABS Avaliada através do Método EWF (Trabalho Essencial de Fratura) – Parte A: Avaliação do Efeito do Compatibilizante. **Polímeros: Ciência e Tecnologia**, 1 março 2007. 36-46.

CUESTA, I. I.; ALEGRE, J. M. Analysis of the effect of the test rate on polymer essential work of fracture parameters for the small punch test. **Journal of Applied Polymer Science**, 20 abril 2016.

DANIEL, I. M.; ISHAI, O. **Engineering Mechanics of Composite Materials**. Nova York: Oxford University Press, 1994.

DASSAULT SYSTÈMES. Abaqus Analysis User's Manual, 2012. Disponível em: <<http://abaqus.software.polimi.it/v6.12/books/usb/default.htm>>. Acesso em: 15 July 2017.

DAVIS, S. C.; WILLIAMS, S. E.; BOUNDY, R. G. Transportation Energy Data Book, Edition 35, Outubro 2016. Disponível em: <http://cta.ornl.gov/data/tedb35/Edition35_Full_Doc.pdf>.

DEGOLU, M. et al. Environmental and economic life cycle assessment of a lightweight solution for an automotive component: A comparison talc-filled and hollow glass microspheres-reinforced polymer composites. **Journal of Cleaner Production**, 20 agosto 2016. 548-560.

ELECTRIC power steering system has nylon resin worm wheel. **Advanced Materials & Processes**, Junho 2004. 62.

FORD picks new composite for bedliner. **Design News**, p. 41, 2000.

FU, S.-Y.; LAUKE, B.; MAI, Y.-W. **Science and engineering of short fibre reinforced polymer composites**. Cambridge: CRC Press, 2009.

GHASSEMIEH, E. Materials in Automotive Application, State of the Art and Prospects. **InTech**, 8 janeiro 2011. Disponível em: <<http://www.intechopen.com/books/new-trends-and-developments-in-automotiveindustry/materials-in-automotive-application-state-of-the-art-and-prospects>>.

GIL, H. M. et al. MINIMIZING PEDESTRIAN LOWER-LEG INJURY CONSIDERING RATE DEPENDENCE OF THE PLASTIC ENERGY ABSORBER. **International Journal of Automotive Technology**, 16 fevereiro 2016. 829-841.

GOODSHIP, V.; MIDDLETON, B.; CHERRINGTON, R. **Design and Manufacture of Plastic Components for Multifunctionality**. Waltham: Elsevier, 2016.

HAN, S. H. et al. Study on high-speed RTM to reduce the impregnation time of carbon/epoxy composites. **Composite Structures**, 23 Agosto 2014.

HOLBERRY, J.; HOUSTON, D. Natural-fiber-reinforced polymer composites in automotive applications. **JOM**, novembro 2006. 80-86.

HOPE, K.; VIETOR, B. How to Mold Long Fiber Reinforced Thermoplastics: Here's the machinery, tooling, and process know how you need to get the most out of these high-performance materials. **Plastics Technology**, v. 60, p. 64-67, 2014.

INOVAR-AUTO. **Ministério da Indústria, Comércio Exterior e Serviços**. Disponível em: <<http://www.mdic.gov.br/competitividade-industrial/principais-aco-es-de-desenvolvimento-industrial/brasil-produtivo/acordos-internacionais-3>>. Acesso em: 10 abril 2017.

JACOB, A. Composite truck beds pick up business. **Reinforced Plastics**, fevereiro 2005. 38-40.

KAR, K. K. **Composite Materials: Processing, Applications. Characterizations**. Berlin: Springer, 2017.

KAUFFMAN, A.; ZIEGLER, M. Processing of Polymers. In: CROLLA, D., et al. **Encyclopedia of Automotive Engineering**. [S.l.]: Wiley, 2015.

KHAN, L. A. et al. Cost-effective manufacturing process for the development of automotive from energy efficient composite materials and sandwich structures. **Polymer Composites**, 2014. 97.

KIM, S.-Y. et al. Mechanical properties and production quality of hand-layup and vacuum infusion processed hybrid composite materials for GFRP marine structures. **International Journal of Naval Architecture and Ocean**, setembro 2014. 723-736.

KOETEN, B. Mold design: designing and selecting quality hot-runner systems. **Plastics Engineering**, Feb 1993. 21-25.

KORONIS, G.; SILVA, A.; FONTUL, M. Green composites: A review of adequate materials for automotive applications. **Composites Part B**, janeiro 2013. 120-127.

KRAUSE, W. et al. LFT-D — A Process Technology for Large Scale Production of Fiber Reinforced Thermoplastic Components. **Journal of thermoplastic composite materials**, 1 julho 2003. 289-302.

LEFRANCHE, E. et al. A microstructural approach for modelling flexural properties of long glass fibre reinforced polyamide 6.6. **Journal of Composite Materials**, 2017. 3-16.

LIU, B.; FENG, X.; ZHANG, S.-M. The effective Young's modulus of composites beyond the Voigt estimation due to the poisson effect. **Composites Science and Technology**, 12 junho 2009. 2198-2204.

LUO, N.; WANG, D.-N.; YING, S.-K. Phase Separation in Segmented Poly(urethane urea) Copolymers during Reaction Injection Molding (RIM) Polymerization. **Journal of Polymer Science**, 30 abril 1997. 865-873.

MACÍAS, C.; MEZA, O.; PÉREZ, E. Relaxation of residual stresses in plastic cover lenses with applications in the injection molding process. **Engineering Failure Analysis**, 26 julho 2015. 490-498.

MANRICH, S. **Processamento de Termoplásticos**: rosca única, extrusão e matrizes, injeção e moldes. São Paulo: Artliber, 2005.

MASON, K. Composite World, 1 dezembro 2006. Disponível em: <<http://www.compositesworld.com/articles/long-fiber-injection-advances-polyurethane-composites>>. Acesso em: 10 fevereiro 2017.

MING, L.; ALBIN, T.; KRISHNA, K. **NX 9.0 for Engineering Design**. [S.l.].

MOLINARO, H. PUR System Wraps Up Pickup's Cargo Box. **Plastics Engineering**, janeiro 2000. 7.

MOLINARO, H. Plastic fuel tank meets PZEV regs. **Plastics Engineering**, maio 2003. 20.

MORGAN, P. **Carbon Fibers and their Composites**. Nova York: CRC Press Taylor & Francis Group, 2005.

MORTAZAVIAN, S.; FATEMI, A. Tensile and fatigue behaviors of polymers for automotive applications. **Materialwissenschaft und Werkstofftechnik**, fevereiro 2015. 204-213.

NAM, B.-K.; PARK, O. O.; KIM, S.-C. Properties of Isotactic Polypropylene/Atactic Polypropylene Blends. **Macromolecular Research**, 2 setembro 2015. 809-813.

NIEUWENHUIS, P.; WELLS, P. **THE GLOBAL AUTOMOTIVE INDUSTRY**. Chichester: John Wiley & Sons, Ltda, 2015.

NISHI, Y. et al. Charpy Impact of Sandwich Structural Composites (CFRP/PC/CFRP) of Polycarbonate (PC) Cores Covered with Carbon Fiber Cross Textile Reinforced Epoxy Polymer (CFRP) Thin Sheets as a Function of Temperature. **Materials Transactions**, 30 maio 2012. 1288-1294.

NISHINO, K. et al. Improvement of impact strength and hydrolytic stability of PC/ABS blend using reactive polymer. **Journal of Applied Polymer Science**, 5 março 2017.

NJUGUMA, J. **Lightweight Composite Structures in Transport: Design, Manufacturing and Analysis**. Cambridge: Elsevier, 2016.

PEACOCK, A. J.; CALHOUN, A. **Polymer Chemistry: Properties and Applications**. Ohio: Hanser Gardner Publications, Inc, 2006.

POVEDA, R. L.; GUPTA, N. **Carbon Nanofiber Reinforced Polymer Composites**. New York: Springer, 2016.

PRADE, F. et al. Nondestructive characterization of fiber orientation in short fiber reinforced polymer composites with X-ray vector radiography. **NDT&E International**, março 2017. 65-72.

PVC compounds for automotive exterior Class-A trim. **Plastics Technology**, abril 2015. 79.

RESTREPO-FLÓREZ, J.-M. et al. Investigation of biofilm formation on polyethylene in a diesel/biodiesel fuel storage environment. **Fuel**, 15 julho 2014. 240-247.

REZENDE, F. C. **Avaliação Experimental da Distribuição de Temperaturas nos Componentes Plásticos de Um Veículo**. [S.l.]: [s.n.], 2010.

RICHAUD, E. et al. New Insights in Polymer-Biofuels Interaction. **Oil & Gas Science and Technology**, abril 2015. 317-333.

SCHWARZ, A.; RUNCIANU, C.-A.; GEBHARDT, A. Expanded Polypropylene Finite Elements Analysis in Transport Application. In: CHIRU, A.; ISPAS, N. **CONAT 2016 International Congress of Automotive and Transport Engineering**. [S.l.]: Springer, 2017. p. 26-35.

SEDGWICK, D. New techniques cut cost of carbon fiber. **Automotive News**, 11 julho 2011. Disponível em: <<http://www.autonews.com/article/20110711/OEM01/307119988/new-techniques-cut-cost-of-carbon-fiber>>.

SEHANOBISH, K. **Engineering Plastics and Plastic Composites in Automotive Applications**. Warrendale: SAE International, 2009.

SHANKAR, S.; SHIVANAND, H.; KUMAR, S. S. CHARACTERISATION OF EPOXY BASED E-GLASS / CARBON REINFORCED POLYMER COMPOSITE LAMINATES SUBJECTED TO LOW VELOCITY IMPACT TEST (DROP WEIGHT). **International Journal of Engineering Science and Technology**, maio 2013. 1083.

SOUZA, M.; MARDEL, J.; FOX, B. Effect of Manufacturing Method and Aging Environment on Painted Automotive Carbon Fibre Composites Surfaces. **Applied Composite Materials**, Outubro 2013. 747-759.

SRIM system for composite pickup box. **Reinforced Plastics**, janeiro 2000. 9.

STEWART, R. Carbon fibre composites poised for dramatic growth. **Reinforced Plastics**, p. 17, 2009.

STRUMBERGER, N.; GOSPOCIC, A.; BARTULIC, C. Polymeric Materials in Automobiles. **Traffic Engineering**, 3 maio 2005. 149-160.

THOMAS, P. G. Resin Transfer Moulding (RTM) - Methods, Benefits and Applications. **AZO Materials**, 29 April 2013. Disponível em: <<http://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=8620>>.

THOMAS, S. et al. **Polymer Composites Volume 1**. Weinheim: Wiley-VCH, 2012.

THOMPSON, M. R. et al. Long term storage of biodiesel/petrol diesel blends in polyethylene fuel tanks. **Fuel**, 5 março 2013. 771-779.

TRUETT, R. GM's lightweight strategy is rocking. **Automotive News**, 3 agosto 2016. Disponível em: <<http://www.autonews.com/article/20160802/OEM10/308039993/gms-lightweight-strategy-is-rocking>>.

TRUETT, R. How Honda made the new Ridgeline's bed sing. **Automotive News**, 1 agosto 2016. Disponível em: <<http://www.autonews.com/article/20160801/OEM03/308029993/how-honda-made-the-new-ridgelines-bed-sing>>. Acesso em: 15 janeiro 2017.

ULMANN'S Polymers and Plastics: Products and Processes. Hamburg: Wiley-VCH, 2016.

WEON, J.-I.; CHOI, K.-Y. Surface Characterization and Morphology in Ar-Plasma-Treated Polypropylene Blend. **Macromolecular Research**, 1 maio 2009. 886-893.

ZHANG, H. et al. Filtration effects of graphene nanoplatelets in resin infusion processes: Problems and possible solutions. **Composites Science and Technology**, 26 Julho 2016. 1-2.

ZHANG, M. C.; GUO, B.-H.; XU, J. A review on polymer crystallization theories. **Crystals**, janeiro 2017. 1-37.

ZUIDEMA, B. K. On the Role of Body-in-White Weight Reduction in the Attainment of the 2012-2025 US EPA/NHTSA Fuel Economy Mandate, 2013. Disponível em: <<http://www.autosteel.org/~media/Files/Autosteel/Great%20Designs%20in%20Steel/GDIS%202013/On%20the%20Role%20of%20Body-in-White%20Weight%20Reduction%20in%20the%20Attainment%20of%20the%20US%20EPANHTSA%20Fuel%20Economy%20Mandate.pdf>>.