

UNIVERSIDADE PRESBITERIANA MACKENZIE
ESCOLA DE ENGENHARIA
MESTRADO EM ENGENHARIA DE MATERIAIS

LUIZ GUSTAVO FRANCO PIRES DE CAMPOS

ESTUDO COMPARATIVO ENTRE MATERIAIS METÁLICOS E COMPÓSITOS
POLIMÉRICOS PARA APLICAÇÕES MECÂNICAS NA INDÚSTRIA
AUTOMOBILÍSTICA

São Paulo
2009

Livros Grátis

<http://www.livrosgratis.com.br>

Milhares de livros grátis para download.

LUIZ GUSTAVO FRANCO PIRES DE CAMPOS

ESTUDO COMPARATIVO ENTRE MATERIAIS METÁLICOS E COMPÓSITOS
POLIMÉRICOS PARA APLICAÇÕES MECÂNICAS NA INDÚSTRIA
AUTOMOBILÍSTICA

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

ORIENTADOR: PROF. DR. JAN VATAVUK

São Paulo
2009

C198e Campos, Luiz Gustavo Franco Pires de.

Estudo comparativo entre materiais metálicos e compósitos
poliméricos para aplicações mecânicas na indústria automobilística /
Luiz Gustavo Franco Pires de Campos. – 2009.

102 f. : il. ; 30 cm.

Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) –
Universidade Presbiteriana Mackenzie, São Paulo, 2009.

Bibliografia: f. 99-102.

1. Zinco. 2. Alumínio. 3. Compósitos plásticos. 4. Fibra de vidro.
I. Título.

CDD 620.112

LUIZ GUSTAVO FRANCO PIRES DE CAMPOS

ESTUDO COMPARATIVO ENTRE MATERIAIS METÁLICOS E COMPÓSITOS
POLIMÉRICOS PARA APLICAÇÕES MECÂNICAS NA INDÚSTRIA
AUTOMOBILÍSTICA

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

Aprovado em ____ de _____ de 2009.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Jan Vatauk
Universidade Presbiteriana Mackenzie

Profa. Dra. Sonia Braunstein Faldini
Universidade Presbiteriana Mackenzie

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

AGRADECIMENTOS

Ao Professor Doutor Jan Vatauvuk pela orientação, compreensão e amizade para o desenvolvimento desta dissertação de mestrado.

Aos meus pais, Sofia Helena e Benedito Luiz, que sempre acreditaram no meu potencial e sempre me motivaram.

À Empresa General Motors do Brasil por ter permitido e apoiado a realização de todas as etapas do curso de pós-graduação.

Aos colegas de trabalho que incentivaram e contribuíram para a realização deste trabalho.

Em especial a minha esposa, Elizabeth Gonçalves Magnes Pires de Campos, pelo incentivo, colaboração e companheirismo durante todas as etapas deste trabalho.

RESUMO

O uso de alumínio e compósitos termoplásticos na indústria automobilística é uma realidade e aumenta gradativamente a cada novo projeto. Os materiais e a sua conversão para componentes são os responsáveis por grande parte do custo de um veículo e a variedade de materiais muda continuamente, devido à eterna busca por soluções mais leves que possam gerar redução de custo e de peso nos veículos. O alumínio e os compósitos termoplásticos são os grandes responsáveis por estas soluções.

A literatura aborda, de uma maneira geral, informações sobre microestrutura e propriedades dos materiais, porém separadamente.

O presente trabalho apresenta uma ampla revisão bibliográfica a respeito do alumínio e suas ligas, zinco e suas ligas, poliamida, fibras e compósitos termoplásticos, tendo como objetivo estabelecer uma comparação da microestrutura e das propriedades entre ligas de alumínio, ligas de zinco e poliamida reforçada com fibra de vidro.

Palavra-chave: Zinco. Alumínio. Compósitos Plásticos. Fibra de vidro

ABSTRACT

Aluminum and plastic composites used in the automotive industry is a reality and increases in new projects. Materials and components are responsible for the most part of vehicle costs and the materials mix is changing continually due to light-weight solutions to reduce vehicle costs and weight. Aluminum and plastics composites are responsible for these solutions.

The literature information about materials micro-structures and properties are shown apart.

This report presents a complete review on aluminum and aluminum alloy, zinc and zinc alloy, polyamide, fibers and plastic composites, focuses on micro-structure and properties comparison between aluminum alloy, zinc alloy and glass fiber reinforced polyamide.

Keyword: Zinc. Aluminum. Plastic Composite. Glass fiber

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 01	Espiral do peso (EAA,2008).....	15
Figura 02	Elementos com maior abundância na crosta terrestre (CBA, 2008).....	20
Figura 03	Estrutura cristalina cúbica de face centrada: (a) representação da célula unitária através de esferas rígidas, (b) célula unitária com esferas reduzidas e (c) um agregado de muitos átomos.....	21
Quadro 01	Os tipos de ligas de alumínio para fundição.....	27
Figura 04	Equilíbrio binário de solubilidade sólida para elementos de ligas de alumínio (ASM,1992).....	28
Quadro 02	Limites da composição química em % de massa da liga A380.0.....	30
Figura 05	Estrutura cristalina hexagonal compacta: (a) célula unitária com esferas reduzidas (a e c representam os comprimentos das arestas curta e comprida, respectivamente) e (b) agregado de muitos átomos.....	31
Quadro 03	Limites da composição química em % de massa da liga de zinco número 5.....	35
Figura 06	Estrutura da Poliamida 6.6.....	36
Figura 07	Estrutura da Poliamida 6.....	36
Figura 08	Poliamida 6, polímero que resulta de uma reação de abertura de anel.....	37
Figura 09	Representação esquemática das ligações de hidrogênio entre duas cadeias moleculares	38
Figura 10	Efeito da umidade relativa na absorção de água no equilíbrio das poliamidas.....	39
Figura 11	Esquema de absorção de água pelas poliamidas.....	40
Figura 12	Efeito das condições ambientais na razão da absorção de umidade na poliamida 6.6 (CHANDA,2007).....	42
Figura 13	Representação esquemática do posicionamento dos íons em um vidro.....	45

Figura 14	Curva esquemática tensão-deformação: (a) para materiais com fibra frágil e matriz dúctil. (b) para um compósito reforçado com fibras alinhadas que está exposto a uma tensão uniaxial aplicada na direção do alinhamento.....	48
Figura 15	Representação esquemática de compósitos reforçados com fibras (a) contínuas e alinhadas, (b) descontínuas e alinhadas e (c) descontínuas e aleatoriamente orientadas.....	50
Figura 16	Padrão de deformação na matriz em volta de uma fibra que está sujeita à aplicação de uma carga de tração.....	51
Figura 17	Perfis tensão-posição quando comprimento da fibra l , é (a) igual ao comprimento crítico, l_c , (b) maior que o comprimento crítico e (c) menor que o comprimento crítico para um compósito reforçado com fibras.....	52
Figura 18	Principais fatores que afetam a resistência de termoplásticos reforçados.....	53
Figura 19	Espelho retrovisor externo de um veículo.....	55
Quadro 04	Limites da composição química em % de massa (Restante da liga é alumínio).....	58
Quadro 05	Limites da composição química em % de massa da liga de zinco número 5.....	59
Imagem 01	Máquina universal de ensaio e dispositivo de teste	63
Imagem 02	Equipamento ICP AES modelo VISTA AX.....	64
Imagem 03	Aparelho FTIR modelo 16PC da marca Perkin Elmer.....	65
Imagem 04	Máquina universal de ensaios QTEST.....	67
Figura 19	Exemplo de ensaio de flexão em três pontos.....	68
Imagem 05	Lixadeira e politriz Struers, modelo rotopol/rotoforce 4.....	69
Imagem 06	Microscópio ótico Carl Zeiss, modelo Axiophot.....	70
Imagem 07	Microscópio eletrônico de varredura.....	71
Imagem 08	Microscópio eletrônico de varredura de bancada Hitachi TM1000.....	72
Figura 20	1ª frequência natural, eixo Z.....	73
Figura 21	2ª frequência natural, eixo X.....	73
Figura 22	Pontos de fixação do espelho retrovisor na configuração base metal e capa em polímero.....	73

Figura 23	Pontos de fixação do espelho retrovisor na configuração base em compósito.....	74
Figura 24	Regiões com tensão após esforço no eixo Z.....	75
Gráfico 01	Resultados da análise virtual nas duas configurações metal e compósito para a primeira frequência natural (Hz).....	76
Gráfico 02	Resultados da análise virtual para a base em compósito.....	77
Figura 25	Base do espelho retrovisor e capa do espelho.....	79
Figura 26	Base do espelho retrovisor utilizando capa integrada.....	79
Imagem 09	Esquema do teste de bancada.....	80
Gráfico 03	Resultados dos testes de bancada.....	81
Figura 27	Espectrofotometria por infravermelho da amostra da base em compósito.....	83
Imagem 10	Microestrutura da liga de zinco número 5.....	85
Imagem 11	Microestrutura da liga de alumínio.....	85
Imagem 12	Base liga Zn.....	86
imagem 13	Região da ruptura.....	86
Imagem 14	Superfície de fratura liga de zinco número 5 (aumento aproximado de 100x).....	86
Imagem 15	Superfície de fratura liga de zinco número 5 (aumento aproximado de 1000x).....	87
Imagem 16	Região aleatória da peça em Zn (aumento aproximado de 50x).....	87
Imagem 17	Região aleatória da peça em Zn (aumento aproximado de 100x).....	88
Imagem 18	Base liga Al.....	88
Imagem 19	Região da ruptura.....	88
Imagem 20	Superfície de fratura da liga de Al (aumento aproximado de 100x).....	89
Imagem 21	Superfície de fratura da liga de Al (aumento aproximado de 1000x).....	89
Imagem 22	Região aleatória da peça em Al (aumento aproximado de 50x).....	90
Imagem 23	Região aleatória da peça em Al (aumento aproximado de 100x).....	90
Imagem 24	Base compósito.....	91
Imagem 25	Região da fratura.....	91
Imagem 26	Superfície de fratura do compósito (aumento aproximado de 100x).....	91
Imagem 27	Superfície de fratura do compósito (aumento aproximado de 200x).....	92
Imagem 28	Superfície de fratura do compósito (aumento aproximado de 500x).....	92

Imagem 29	Superfície de fratura do compósito (aumento aproximado de 1000x)...	93
Imagem 30	Região aleatória da peça em compósito (aumento aproximado de 50x).....	94
Imagem 31	Região aleatória da peça em compósito (aumento aproximado de 100x).....	94
Imagem 32	Região aleatória da peça em compósito (aumento aproximado de 500x).....	95
Imagem 33	Região aleatória da peça em compósito (aumento aproximado de 1000x).....	95
Imagem 34	Região aleatória da peça em compósito (aumento aproximado de 1500x).....	96
Imagem 35	Região aleatória da peça em compósito (aumento aproximado de 5000x).....	96

LISTA DE TABELAS

Tabela 01	Propriedades das poliamidas 6 e 6.6 (MARK, 1999).....	41
Tabela 02	Eficiência de reforço de compósitos reforçados com fibras para diferentes orientações das fibras e as várias direções de aplicação das tensões.....	51
Tabela 03	Efeito do reforço de fibra longas e curtas na resistência à flexão (MAXWELL, 1983).....	54
Tabela 04	Propriedades mecânicas da liga de alumínio.....	58
Tabela 05	Propriedades físicas da liga de alumínio.....	58
Tabela 06	Propriedades mecânicas da liga de zinco número 5.....	60
Tabela 07	Propriedades físicas da liga de zinco número 5.....	60
Tabela 08	Propriedades mecânicas da poliamida 6 com 30% de fibra de vidro.	60
Tabela 09	Propriedades físicas da poliamida 6 com 30% de fibra de vidro.....	61
Tabela 10	Características dos materiais utilizadas na análise virtual.....	75
Tabela 11	Resultados da análise virtual.....	75
Tabela 12	Valores da simulação da base utilizando uma única peça.....	76
Tabela 13	Análise dos resultados dos materiais da base do espelho retrovisor...	78
Tabela 14	Testes físicos nos espelhos retrovisores externos de veículos automotores.....	78
Tabela 15	Peso dos conjuntos espelho retrovisor externo.....	79
Tabela 16	Peso das peças do conjunto espelho retrovisor externo.....	80
Tabela 17	Composição química da amostra com liga de zinco.....	82
Tabela 18	Composição química da amostra com liga de alumínio.....	82
Tabela 19	Propriedades físicas dos materiais.....	83
Tabela 20	Teor de carga das amostras da base em compósito.....	84
Tabela 21	Resultados dos ensaios de flexão três pontos conforme ISO178.....	84

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	14
1.1	OBJETIVO GERAL.....	16
1.2	JUSTIFICATIVA.....	16
1.3	METODOLOGIA.....	17
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	19
2.1	LIGAS METÁLICAS.....	19
2.2	ALUMÍNIO.....	19
2.2.1	Ligas de alumínio.....	24
2.2.2	Ligas de alumínio para fundição.....	25
2.3	ZINCO.....	31
2.3.1	Ligas de zinco.....	32
2.4	POLIAMIDAS.....	35
2.5	REFORÇOS.....	43
2.5.1	Fibras de vidro.....	43
2.6	COMPÓSITOS TERMOPLÁSTICOS.....	45
2.7	ESPELHOS RETROVISORES EXTERNOS DE VEICULOS AUTOMOTORES.....	54
3	MATERIAIS E MÉTODOS.....	57
3.1	MATERIAIS.....	57
3.1.1	Liga de alumínio.....	57
3.1.2	Liga de zinco.....	59
3.1.3	Poliamida 6 reforçada com fibra de vidro.....	60
3.2	MÉTODOS.....	61
3.2.1	Análise virtual e testes físicos.....	61
3.2.2.	Teste de bancada na base do espelho retrovisor externo.....	62
3.2.3	Caracterização dos materiais.....	63
3.2.3.1	Análise química.....	63
3.2.3.2	Espectroscopia vibracional de absorção no infravermelho.....	64
3.2.3.3	Ensaio mecânicos.....	66
3.2.3.4	Análise metalográfica.....	69

3.2.3.5	Análise fractográfica.....	70
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	73
4.1	ANÁLISE VIRTUAL.....	73
4.2	TESTES FÍSICOS.....	78
4.3	TESTES DE BANCADA.....	79
4.4	CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS.....	81
4.4.1	Análise química.....	81
4.4.2	Identificação do polímero através do sistema espectrofotométrico de infravermelho.....	82
4.4.3	Propriedades físicas dos materiais.....	83
4.4.4	Ensaio de flexão três pontos.....	84
4.4.5	Análise metalográfica.....	85
4.4.6	Fractografia.....	86
4.5	DISCUSSÃO GERAL.....	97
5	CONCLUSÃO.....	98
	REFERÊNCIAS.....	99

1 INTRODUÇÃO

No mercado atual bem como no futuro, os componentes mecânicos devem acompanhar as tendências mercadológicas exigindo a utilização de materiais que possibilitem melhor desempenho e quando possível aliado ao menor custo final do produto. Se ocorrer um desenvolvimento no modo de processamento de certo tipo de material que tenha como consequência uma diminuição significativa do seu custo, é provável que este possa ser utilizado em substituição a algum material já consagrado em alguma aplicação.

Outro fator que influencia a substituição de materiais é o desenvolvimento de um novo material com propriedades mais adequadas para as aplicações pretendidas. Assim ao longo de um determinado período de tempo, o grau de utilização de diferentes materiais sofre modificações.

O alumínio e os compósitos plásticos são os principais responsáveis por estas transformações e modificações devido ao fato de serem mais leves e com processos de fabricação mais acessíveis. No aspecto da reciclagem a vantagem maior cabe ao alumínio.

Em termos de volume, a partir de 1950, a produção de alumínio tornou-se mais significativa (EAA,2008), assim como no caso dos polímeros, sua utilização também começou a ser mais percebida a partir da década de 50 (MAXWELL, 1994), principalmente em função de sua menor densidade quando comparada aos materiais metálicos, além de uma melhor relação resistência/densidade principalmente quando comparada a produtos confeccionados com madeira.

A competição entre materiais está evidenciada na composição dos automóveis dos nossos dias. A massa total de um automóvel do modelo médio nos Estados Unidos da América entre 1976 e 1986 diminuiu 16%, de 1705 kg para 1438 kg, em grande parte devido a diminuição do uso de aços convencionais em 29% (de 941 kg para 667 kg) e um acréscimo no uso de ligas de alumínio de 63% (de 39 kg para 63 kg), assim como o crescimento do uso de polímeros e compósitos em 33% (de 74 kg para 98 kg) (SHACKELFORD,1996).

A atenção da indústria automobilística se voltou para elementos estruturais e materiais alternativos. Investiu-se em monoblocos mais leves, peças do motor em alumínio e peças de acabamento em plástico. Vale salientar que perdas consideráveis de peso seriam alcançadas se materiais de baixa densidade fossem aplicados na carroceria e no conjunto motor-transmissão.

Esta é a única forma de garantir todo avanço tecnológico a bordo do veículo, compensando o acréscimo de peso devido aos requisitos mais severos das legislações e as mudanças na demanda dos consumidores (opcionais como airbags, GPS, MP3, DVD, freios com sistema ABS e toda eletrônica embarcada nos veículos) que para atender as expectativas e os níveis de desempenho gera um fenômeno conhecido como espiral de peso.

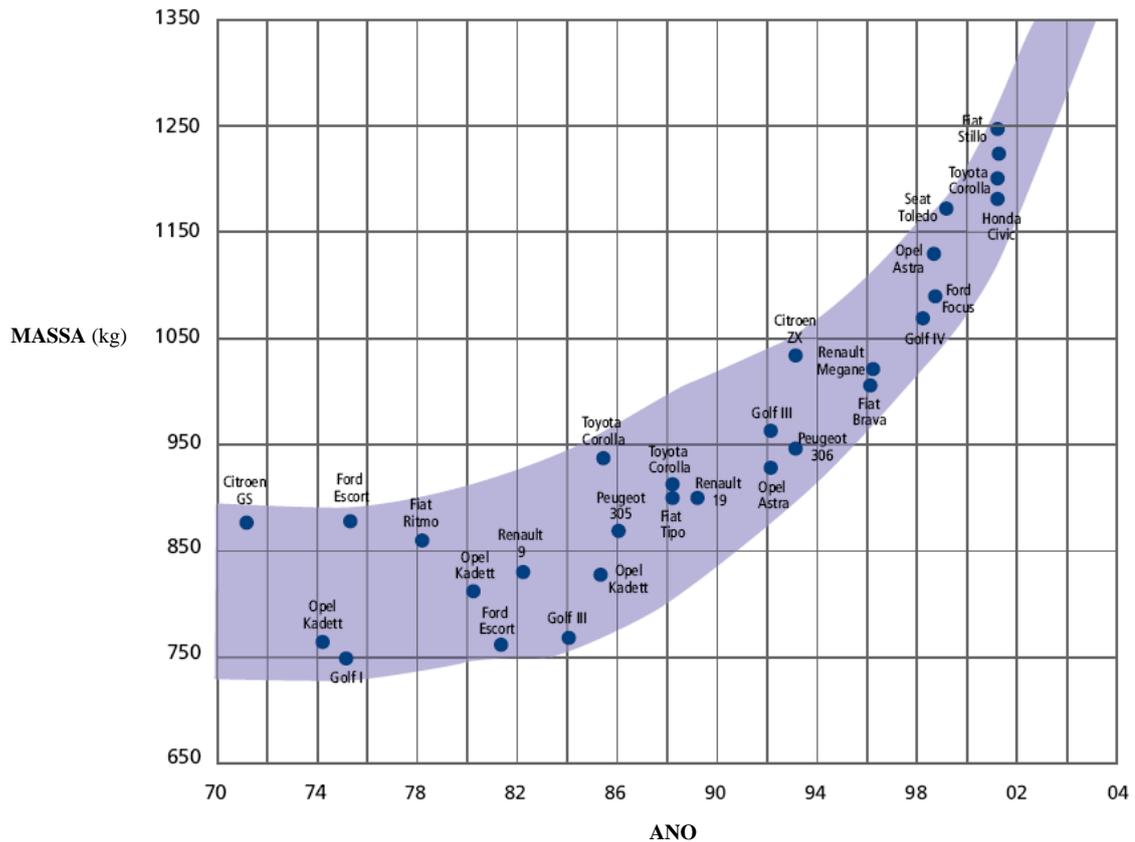


Figura 01: Espiral do peso (EAA, 2008).

Para inverter este espiral do peso, a redução de massa dos veículos é uma necessidade. O potencial de economia de combustível com a redução de massa é significativo e uma redução de peso sem nenhuma percepção da funcionalidade do carro pode ser obtida com a substituição de um material mais pesado por um mais leve, mas também pode ser obtido com a introdução de novos produtos e conceitos de manufatura, ou no caso ideal com uma combinação destes métodos (EAA, 2008).

Em relação à introdução de materiais, os novos materiais são mais caros que os tradicionais. Eles precisam então responder melhor às exigências de custo, apresentando uma abordagem diferente da funcionalidade das diferentes peças ou componentes, via integração de funções dentro do veículo. Eles provocam também uma profunda modificação das

tecnologias de fabricação e montagem e mesmo da organização das linhas de montagem. É toda a integração concepção/produção que é questionada (MAEDER, 1997).

Os materiais e a sua conversão para componentes são os responsáveis por mais da metade do custo de um veículo. A variedade de materiais muda continuamente, devido à eterna busca por soluções mais leves que possam gerar redução de custo e de peso nos veículos. O alumínio e os compósitos plásticos são os grandes responsáveis por estas soluções. Os novos projetos, aliados as análises virtuais de componentes, de veículos e dos materiais, estão com o foco de desenvolvimento na economia de combustíveis, redução de peso, potencial de estilo, projeto funcional, novos efeitos, manutenção reduzida dos componentes e resistência à corrosão. Devido ao objetivo estabelecido e baseado nos estudos dos novos projetos das indústrias automobilísticas, a troca de materiais nas peças e componentes possibilita aos engenheiros e projetistas a liberdade para realizar as alterações necessárias no projeto para atender as necessidades e requisitos estabelecidos para os veículos.

1.1 OBJETIVO GERAL

Baseado na busca por redução de massa e de custo nos veículos automotores, sem afetar a qualidade percebida pelo cliente, o presente estudo tem como objetivo avançar na pesquisa da correlação entre microestrutura e propriedades de compósitos termoplásticos e ligas de metais não ferrosos, materiais utilizados em larga escala na indústria automobilística.

1.2 JUSTIFICATIVA

Há uma enorme busca por soluções que reforcem as estruturas dos componentes dos veículos e que tragam redução de massa e de custos nos veículos automotores.

Considerações como a disponibilidade de diferentes materiais, rigidez, comportamento dinâmico, beleza, facilidade na manufatura do componente e durabilidade tornaram-se significativas nos desenvolvimentos dos componentes automotivos.

O uso de ferramentas como a engenharia auxiliada por computador ou CAE (“*Computer Aided Engineering*”) se tornou inevitável devido à complexidade envolvida nos projetos, no tempo de construção de protótipos e nos custos envolvidos em ferramentais para estes protótipos.

A literatura aborda, de uma maneira geral, informações sobre microestrutura e propriedades dos compósitos termoplásticos e das ligas de metais não ferrosos, porém separadamente. No desenvolvimento do trabalho pretende-se utilizar estas informações no esclarecimento de características obtidas em componentes de forma conjunta.

Este exercício de comparação entre estes materiais para uma determinada aplicação possibilitará a ampliação da aplicação de conceitos na substituição de materiais na indústria automobilística.

Utilizamos neste trabalho comparativo os seguintes materiais: liga de alumínio, liga de zinco e compósitos termoplásticos, que nos proporcionam diferentes resultados em termos de peso, resistência mecânica, simplicidade de fabricação, custo e aspecto visual.

1.3 METODOLOGIA

Análise virtual das peças nas duas condições de materiais (metais versus compósitos) foi realizada para determinar as solicitações principais e um comparativo dos materiais, estabelecendo-se assim a metodologia do teste de bancada para as mais críticas situações de carregamento.

Testes físicos em veículos com os espelhos retrovisores externos nas diferentes configurações de materiais foram realizados para comparação com os resultados obtidos nas análises virtuais.

Testes de bancada simulando as solicitações de campo de maneira exacerbada foram realizados nas peças para análises de seu modo de ruptura. Este ensaio permitiu julgar quais materiais apresentaram uma melhor resposta a solicitação.

As superfícies de fratura para todas as condições de testes foram observadas através de microscopia eletrônica de varredura para uma melhor caracterização da relação microestrutura/propriedades.

A caracterização dos materiais foi feita utilizando-se as técnicas de análise em laboratório, como análise da composição química, análise metalográfica, e após testes

destrutivos em bancada, análise fractográfica. Ensaios mecânicos em corpos de prova também foram executados para dar ênfase no estudo.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 LIGAS METÁLICAS

Os metais e as ligas têm diversas propriedades tecnicamente úteis, propriedades estas que encontram uma vasta aplicação em projetos de engenharia. O ferro e suas ligas (principalmente o aço) contribuem com cerca de 90% da produção mundial de metais (SMITH, 1998), fundamentalmente devido à combinação de uma boa resistência, tenacidade, e ductilidade com um preço relativamente baixo. Cada metal tem propriedades especiais para determinadas aplicações em engenharia e é selecionado depois de uma análise comparativa de custos com outros metais e materiais.

As ligas a base de ferro são denominadas ligas ferrosas e as ligas a base de outros metais são designadas por ligas não ferrosas.

Os metais e suas ligas ferrosas são consumidos em quantidades extraordinariamente grandes, pois eles possuem uma enorme variedade de propriedades mecânicas, podem ser fabricados com relativa facilidade, e são econômicos de serem produzidos. Entretanto, eles possuem algumas limitações bem definidas como densidade relativamente alta, condutividade elétrica comparativamente baixa e suscetibilidade inerente a corrosão em alguns ambientes usuais. Assim sendo, para muitas aplicações torna-se vantajoso ou até mesmo necessário a utilização de ligas não ferrosas que possuam combinações de propriedades mais apropriadas (CALLISTER, 2002).

As ligas metálicas não ferrosas de alumínio e de zinco serão objetos do presente estudo.

2.2 ALUMÍNIO

O alumínio é o terceiro elemento mais abundante na crosta terrestre. A disponibilidade de bauxita, o minério bruto do qual é obtido o alumínio, é praticamente inesgotável.

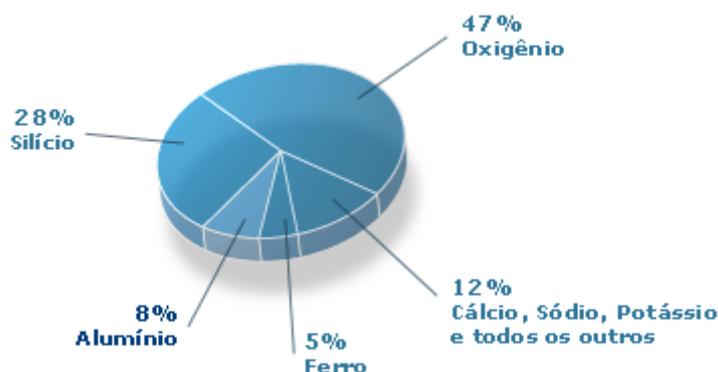


Figura 02: Elementos com maior abundância na crosta terrestre (CBA, 2008)

O alumínio, apesar de ser o terceiro elemento mais abundante na crosta terrestre, é o metal mais jovem usado em escala industrial. Mesmo utilizado milênios antes de Cristo, o alumínio começou a ser produzido comercialmente há cerca de 150 anos. Sua produção atual supera a soma de todos os outros metais não ferrosos. Esses dados já mostram a importância do alumínio para a nossa sociedade. Antes de ser descoberto como metal isolado, o alumínio acompanhou a evolução das civilizações. Sua cronologia mostra que, mesmo nas civilizações mais antigas, o metal dava um tom de modernidade e sofisticação aos mais diferentes artefatos (ABAL, 2008).

Hoje, os Estados Unidos e o Canadá são os maiores produtores mundiais de alumínio. Entretanto, nenhum deles possui jazidas de bauxita em seu território, dependendo exclusivamente da importação. O Brasil tem a terceira maior reserva do minério no mundo, localizada na região amazônica, perdendo apenas para Austrália e Guiné. Além da Amazônia, o alumínio pode ser encontrado no sudeste do Brasil, na região de Poços de Caldas (MG) e Cataguases (MG) (ABAL, 2008).

A bauxita é o minério mais importante para a produção de alumínio, contendo de 35% a 55% de óxido de alumínio, além de sílica, óxidos de ferro e titânio.

Em média, são necessárias de 4 a 5 toneladas de bauxita para se produzir 2 toneladas de alumina para então produzir 1 tonelada de alumínio (EAA, 2008).

Após a sua extração, a bauxita é trabalhada através de inúmeros processos, até a transformação do alumínio em produtos para o mercado.

O alumínio possui uma combinação de propriedades que o torna um material muito útil na engenharia. O alumínio tem densidade baixa ($2,70\text{g/cm}^3$) e possui uma estrutura cristalina CFC (cúbica de faces centradas), a sua ductilidade é mantida até mesmo em temperaturas reduzidas (CALLISTER, 2002).

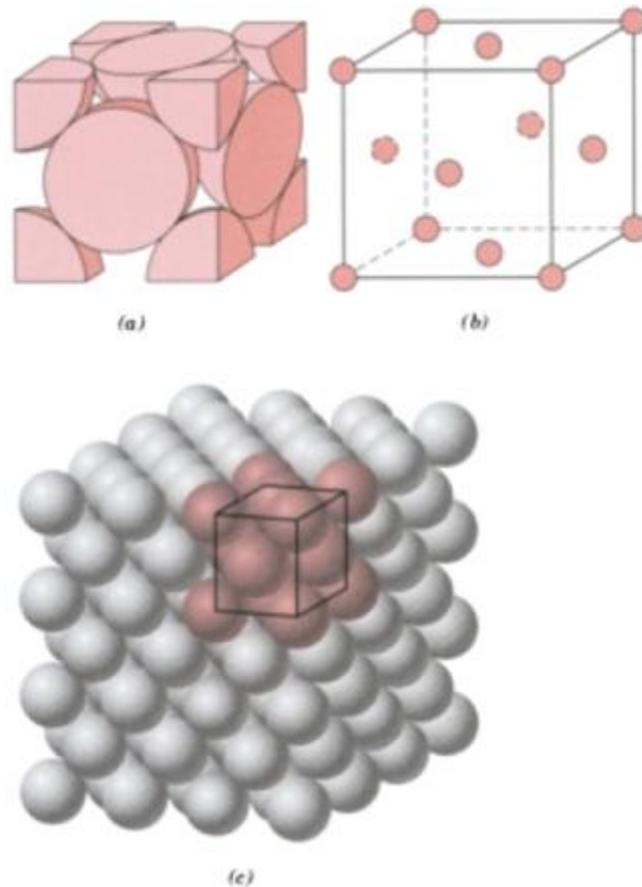


Figura 03: Estrutura cristalina cúbica de face centrada: (a) representação da célula unitária através de esferas rígidas, (b) célula unitária com esferas reduzidas e (c) um agregado de muitos átomos

O alumínio tem também boa resistência à corrosão na maioria dos meios naturais, devido à estabilidade do filme de óxido que se forma na superfície. Muito embora o alumínio apresente baixa resistência mecânica, as ligas de alumínio podem atingir valores de resistência mecânica na ordem de 570 MPa para uma liga forjada e tratada termicamente (i.e. liga de alumínio 7075) utilizada em peças estruturais de aeronaves e outras aplicações submetidas a tensões elevadas (CALLISTER, 2002).

Os valores das propriedades mecânicas podem dividir-se em dois grupos:

Valores garantidos: parâmetros mínimos estabelecidos pelas especificações;

Valores típicos: obtidos por meio de dados estatísticos propiciados por ensaios rotineiros, que garantem que o material obedece às especificações.

O limite de resistência à tração é a máxima tensão sob tração sustentada pelo corpo de prova durante o ensaio de tração, calculado através da relação entre a força máxima aplicada durante o teste e a área inicial da seção transversal do corpo de prova, é a máxima

carga ou força de tração que o material resiste antes de haver sua ruptura (HIGGINS, 1982). Para o alumínio puro recozido, essa razão é de aproximadamente 48MPa (4,9 kg/mm²). O valor aumenta em função da liga, do trabalho a frio e do tratamento térmico (quando possível), podendo como já mencionado anteriormente chegar à ordem de 570 MPa para uma liga de alumínio forjada e tratada termicamente.

O limite de escoamento consiste na tensão em que o material começa a deformar-se plasticamente. É importante definir este grau de deformação permanente porque as ligas de alumínio não possuem limite de escoamento tão pronunciado como a maioria dos aços. O limite do alumínio puro é de aproximadamente 12,7 MPa (1,3 kg/mm²) (ABAL, 2008). Esta propriedade é também fortemente dependente da presença de elementos de liga e tratamentos térmicos específicos, podendo chegar a valores da ordem de 496 MPa (50,6 kg/mm²) (MANUAL).

O alongamento é expresso em porcentagem relativamente ao comprimento original medido em um corpo-de-prova normal e é calculado pela diferença entre os pontos de referência, antes e depois do ensaio de tração (HIGGINS, 1982). Esse alongamento indica a ductilidade do metal ou da liga. Quanto mais fino o corpo-de-prova, menor será o alongamento e vice-versa. O alongamento guarda a relação estreita com a resistência, em geral diminuindo na medida em que a última aumenta.

A dureza é definida como a medida da resistência de um metal à penetração. Existem várias maneiras de se determinar a dureza de um material. Para os metais, os mais comuns são os métodos de Brinell, Vickers e Rockwell (HIGGINS, 1982). Não existe uma relação direta entre o valor da dureza e as propriedades mecânicas das várias ligas de alumínio. Os elementos de liga aumentam em muito sua resistência com o alumínio, assim como o tratamento térmico e o endurecimento pelo trabalho a frio. Entretanto a dureza é significativamente mais baixa do que a maioria dos aços (ABAL,2008).

O módulo de elasticidade (Young) é a relação entre a tensão aplicada e a deformação elástica que ela produz, ou seja, é a tensão necessária para produzir uma quantidade unitária de deformação elástica (HIGGINS, 1982). O módulo de elasticidade está vinculado à rigidez do material e o seu valor é muito importante. O módulo de elasticidade do alumínio é de 68 GPa (7030 kg/mm²). A adição de outros materiais nas ligas não altera esse valor consideravelmente, e o mesmo pode chegar a até 71 GPa (7320 kg/mm²) (MANUAL).

Portanto, o índice do alumínio representa um terço do módulo de elasticidade do aço. Essa propriedade proporciona ao alumínio a vantagem de dar às estruturas de

alumínio uma elevada capacidade de amortecer golpes e reduzir as tensões produzidas pela variação da temperatura (ABAL, 2008).

A maioria dos materiais sólidos se expande quando é submetida a um aquecimento e se contrai quando é submetida a um resfriamento, a variação no comprimento em função da temperatura é conhecido por coeficiente linear de expansão térmica e possui unidades do inverso da temperatura [$(^{\circ}\text{C})^{-1}$ ou $(^{\circ}\text{F})^{-1}$].

O coeficiente linear de expansão térmica para os metais variam entre 5×10^{-6} e $25 \times 10^{-6} (^{\circ}\text{C})^{-1}$, os valores para o alumínio e o aço são mostrados a seguir: coeficiente linear de expansão térmica do alumínio é na ordem de $23,6 [(^{\circ}\text{C})^{-1} \times 10^{-6}]$ e do aço na ordem de $12 [(^{\circ}\text{C})^{-1} \times 10^{-6}]$ (CALLISTER, 2002). Portanto o valor do coeficiente linear de expansão térmica do alumínio é o dobro do aço.

Quando uma tensão oscilante é aplicada por um certo número de vezes sobre um mesmo material, mesmo que os impactos tenham força inferior ao seu limite de resistência à tração, é previsível uma falha por tensão de fadiga. Em muitas ligas de alumínio, como na maioria dos materiais não ferrosos, não há um limite inferior de tensão abaixo do qual a fadiga nunca possa ocorrer, mas quanto menor a tensão, maior o número de ciclos necessários para produzir a falha. No alumínio, em testes normais, o limite de resistência a fadiga chega a 50 milhões de ciclos de inversão de tensão e pode variar de 25% a 50% da tensão de ruptura, conforme a liga (ABAL, 2008).

O alumínio puro funde a 660°C , o que restringe a temperatura máxima em que o alumínio pode ser utilizado, e várias ligas possuem um ponto de fusão inferior a esse. O metal puro e muitas ligas perdem um pouco a sua resistência, ficando sujeitas a uma lenta deformação plástica, chamada de fluência, se permanecer sob tensão por longos períodos em temperaturas acima de 200°C . Por outro lado, ligas feitas para serviços em altas temperaturas, como às usadas em pistões, retêm suas propriedades adequadamente, funcionando satisfatoriamente dentro da faixa de temperatura de trabalho requerida.

Quando exposto a temperaturas baixas, o alumínio não se torna frágil, pois não ocorre mudança no seu mecanismo de fratura. Sua resistência aumenta sem perder a ductilidade, podendo ser utilizado como material para aplicações onde ocorre solicitação extrema, como é o caso das embarcações polares que transitam em mares gelados, sem prejuízo da tenacidade como ocorre para os aços.

Podemos citar um projeto de construção naval em liga de alumínio de Thierry Stump, o Paratii II utilizado por Amyr Klink para viajar ao redor do mundo, utilizando como matéria prima do casco alumínio (STUMP E VATAVUK, 2000), ou na construção de tanques

soldados para armazenamento de gás metano liquefeito, em temperaturas de -160°C utilizando uma liga de Al-Mg (ABAL,2008)

2.2.1 Ligas de alumínio

As ligas de alumínio dividem-se em dois grupos principais: ligas para forjar e ligas para fundir. As ligas para forjar são aquelas em que o metal fundido é mecanicamente trabalhado por processos como laminação, extrusão ou forjamento e se dividem em duas classes: ligas não tratáveis termicamente (cujas propriedades mecânicas se determinam pela qualidade de trabalho a frio a que se submetem após a última operação de recozimento) e ligas termicamente tratáveis (cujas propriedades mecânicas podem ser melhoradas por tratamento térmico). As ligas para fundir são aquelas em que o metal é fundido em sua conformação final, em certas ligas, a resistência que lhe foi aumentada pela adição de ingredientes metálicos pode ser melhorada ainda mais por tratamento térmico (MANUAL).

Um dos aspectos que tornam as ligas de alumínio tão atraentes como materiais de construção mecânica é o fato de o alumínio poder combinar-se com a maioria dos metais de engenharia, chamados de elementos de liga. Com essas associações, é possível obter características tecnológicas ajustadas de acordo com a aplicação do produto final. Mas para isso, é preciso conhecer bem as vantagens e limitações de cada elemento para fazer a melhor seleção, os principais elementos de liga incluem o cobre, o magnésio, o silício, o manganês e o zinco (MANUAL).

O grande alcance das ligas oferece à indústria uma grande variedade de combinações de resistência mecânica, resistência à corrosão e ao ataque de substâncias químicas, condutibilidade elétrica, usinabilidade, ductibilidade, formabilidade, entre outros benefícios.

A função de cada elemento da liga se altera de acordo com a quantidade dos elementos presentes na liga e com a sua interação com outros elementos.

Em geral, podemos dividir os elementos entre elementos que conferem à liga a sua característica principal (resistência mecânica, resistência à corrosão, fluidez no preenchimento de moldes, etc.) e elementos que têm função acessória, como o controle de microestrutura, de impurezas e traços que prejudicam a fabricação ou a aplicação do produto, os quais devem ser controlados no seu teor máximo.

A composição química do alumínio e suas ligas são expressas em porcentagem, obedecendo a normas internacionais que abrangem os sistemas de classificação das ligas forjadas, das ligas para fundição, peças, lingotes e de alumínio primário.

2.2.2 Ligas de alumínio para fundição

Os três principais processos de fundição das ligas de alumínio são: fundição em molde de areia, fundição em moldes permanentes ou semi-permanentes e fundição por injeção (ou fundição sob pressão) (MANUAL). Além destes empregam-se ainda, limitadamente, a fundição centrífuga, a de precisão (cera perdida), moldagem em gesso e a moldagem em casca. (GOMES,1976)

A fundição em molde de areia é o processo de vazamento mais simples e mais versátil das ligas de alumínio. O processo de fundição em molde de areia é geralmente utilizado na produção de pequenas quantidades de peças fundidas idênticas, peças vazadas complexas, com interiores complicados, peças grandes vazadas e estruturas vazadas (MANUAL).

Peças fundidas de uma mesma liga e com a mesma forma, obtidas em um molde permanente, tem uma estrutura de grãos mais finos e maior resistência mecânica do que as peças fundidas em molde de areia. A velocidade de arrefecimento elevada que se atinge no vazamento em molde permanente conduz a uma estrutura de grão fino. Além disso, o vazamento em molde permanente dá origem a menores contrações e menores porosidades gasosa do que o vazamento em molde de areia. No entanto, os moldes permanentes têm limitações de tamanho e para peças muito complexas este tipo de vazamento é difícil ou mesmo impossível (MANUAL).

Na fundição por injeção (ou fundição sob pressão) atingem-se taxas de produção máximas no vazamento de peças idênticas, sendo o metal líquido forçado a entrar no molde por ação de uma pressão elevada. As duas metades do molde metálico estão convenientemente fechadas para garantir uma pressão elevada e o alumínio líquido é forçado a preencher as cavidades do molde. Após a solidificação do metal, o molde é aberto de modo a retirar-se a peça vazada, ainda quente. As duas metades do molde são novamente fechadas e o ciclo de vazamento é repetido.

Algumas das vantagens da fundição por injeção são: as peças vazadas por injeção estão praticamente acabadas e podem ser produzidas a velocidades elevadas; permite obter peças com tolerâncias dimensionais mais apertadas do que nos outros processos de fundição; obtêm-se superfícies de vazamento lisas; o arrefecimento rápido inerente a este processo permite obter uma estrutura de grão fino e o processo pode ser facilmente automatizado (MANUAL).

As ligas de alumínio para fundição, no decorrer dos anos, foram desenvolvidas com o objetivo de melhorar as propriedades relacionadas com a fluidez, a capacidade de alimentação dos moldes, as propriedades como a resistência mecânica, a ductilidade e a resistência a corrosão. Por isso as composições destas ligas são muito diferentes das composições das ligas de alumínio para trabalho mecânico.

Diferentemente dos materiais trabalháveis, que estão sujeitos a uma variação dos processos de aquecimento e de resfriamento, as ligas de fundição adquirem suas propriedades na condição de fundida (em alguns casos, com tratamento térmico) e, conseqüentemente, um grupo diferente de ligas tem sido formulado para a produção de peças fundidas.

As ligas empregadas nas aplicações gerais de engenharia freqüentemente contêm silício para melhorar suas características de fundição, tais como fluidez (no vazamento) e resistência a trincas de contração (quando o metal quente se solidifica e se contrai).

O cobre também é freqüentemente utilizado como um elemento de liga, para proporcionar às propriedades mecânicas uma maior dureza e resistência exigidas em serviço.

As ligas alumínio-magnésio apresentam maiores problemas na fundição, mas possuem boa resistência e ductilidade. Elas são amplamente utilizadas, particularmente em ambientes agressivos, como, por exemplo, em peças e acessórios de navios.

Uma pequena proporção de magnésio também está presente em algumas ligas em conjunto com silício para melhorar sua resposta a tratamentos térmicos, como por exemplo, solubilização e envelhecimento.

Algumas ligas de alumínio para fundição contém ainda outros elementos de liga, tais como zinco, estanho, titânio e cromo.

As ligas de alumínio para fundição estão agrupadas segundo os principais elementos de liga que contém, as composições são descritas com um sistema de três dígitos seguido de um valor decimal. Este sistema de nomenclatura foi desenvolvido pela Associação do Alumínio (AA) onde o decimal .0 para todos os casos refere-se aos limites da liga de

fundição e os decimais .1 e .2 referem-se as composições do lingote, que após a fundição e processamento deve atender aos requisitos químicos conforme a especificações da liga de fundição.

1xx.x	Alumínio 99,00% mínimo
2xx.x	Ligas em que o cobre é o principal elemento de liga, mas outros elementos de liga podem ser especificados
3xx.x	Ligas em que o silício é o principal elemento de liga, mas outros elementos de liga, como cobre e magnésio são especificados
4xx.x	Ligas em que o silício é o principal elemento de liga
5xx.x	Ligas em que o magnésio é o principal elemento de liga
6xx.x	Série livre
7xx.x	Ligas em que o zinco é o principal elemento de liga, mas outros elementos de liga, como cobre e magnésio são especificados
8xx.x	Ligas em que o estanho é o principal elemento de liga
9xx.x	Série livre

Quadro 01: Os tipos de ligas de alumínio para fundição

Os principais tipos de ligas de alumínio para fundição contém ferro e silício, assim como dois ou mais elementos intencionalmente adicionados para melhorar as propriedades das ligas conforme descrito anteriormente.

As características do produto e o efeito do emprego dos vários elementos de liga são sintetizados a seguir (GOMES, 1976).

Silício (Si) é o elemento mais utilizado nas ligas de alumínio para fundição.

O silício, em quantidade entre 5 e 12%, é o elemento de liga mais importante das ligas de alumínio para fundição, pois, aumenta a fluidez do alumínio líquido, permitindo que ele flua através de delgadas paredes na cavidade do molde e reproduza detalhes mais delicados. Ele também reduz a contração externa, melhora a estanqueidade (menor porosidade) no produto fundido, reduz o coeficiente de expansão e melhora a soldabilidade. Em teores altos o silício torna difícil a usinagem das peças.

Contribui para a resistência mecânica, principalmente quando combinado com o magnésio por tornar a liga tratável termicamente. O silício preferivelmente deve estar na liga no estado modificado que diz respeito à forma dos cristais de silício, isto é, em formas arredondadas e bastante dispersas na matriz de alumínio. O ferro presente em mais de 1,5% pode causar uma estrutura grossa e quebradiça no silício alto, mas previne o metal de soldar-se ao molde metálico na fundição em molde permanente; vem daí a justificativa de

prescreverem-se baixos teores de ferro nas ligas fundidas em areia e mais altos teores nas ligas fundidas em moldes permanentes.

Cobre (Cu) foi um dos primeiros elementos de liga empregados e ainda tem largo uso, é um dos principais constituintes endurecedores das ligas de fundição.

Aumenta a resistência tanto da liga tratada como sem tratamento térmico. O cobre é bastante solúvel no alumínio em alta temperatura (5% a 524°C) e apenas ligeiramente solúvel à temperatura ambiente.

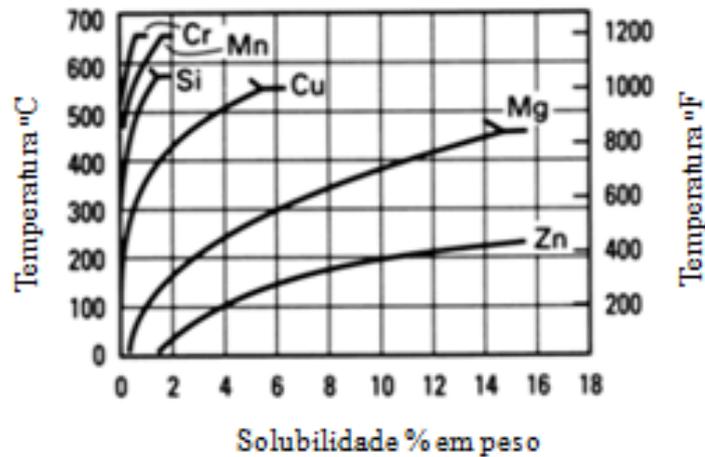


Figura 04: Equilíbrio binário de solubilidade sólida para elementos de ligas de alumínio (ASM,1992)

Esta característica torna essas ligas termicamente tratáveis e permite grande melhora nas propriedades mecânicas. Para os melhores resultados no tratamento térmico o cobre é acrescentado em proporções (3 a 11%) que o fazem completamente ou parcialmente solúvel em temperatura abaixo do ponto de fusão.

A maioria das ligas tratáveis com cobre situam-se numa faixa de 3 a 5% de cobre ao lado de outros elementos que controlam a solubilidade ou na faixa de 7 a 11%, também com outros elementos. As vantagens da presença do cobre nas peças fundidas são uma diminuição na contração interna e melhora na usinabilidade. Todavia, comparado ao silício, o cobre é inferior porque acarreta fragilidade a quente e menor fluidez. Além das vantagens descritas acima, reduz severamente a resistência à corrosão da peça devido às reações galvânicas que em ambiente úmido ou atmosfera salina, manifestam-se entre a matriz de alumínio e as partículas ricas em cobre, causando corrosão.

Magnésio (Mg) pode ser considerado o terceiro mais importante elemento de liga, de modo semelhante ao cobre, o magnésio tem características de solubilidade sólida que permitem à liga ser tratável termicamente.

Ligas com mais de 8% de Mg respondem ao tratamento térmico, se o teor for inferior ela não responderá ao tratamento a menos que haja outros elementos presentes, como o cobre e o silício. A presença do magnésio torna mais difícil a fundição devido à tendência à oxidação (formação de borra).

A absorção de ferro, silício, cobre ou outros elementos, é muito prejudicial às propriedades da liga binária simples; o inconveniente é tanto maior quanto mais elevado for o magnésio, isso recomenda cuidados especiais na manipulação dessas ligas de fundição.

Para melhores resultados é recomendável a fluxagem (lavagem) da liga líquida com cloro gasoso para remover os óxidos gerados na fusão.

Em geral, as adições de magnésio promovem a resistência mecânica e a ductilidade, também melhoram a resistência à corrosão e a usinabilidade.

Titânio (Ti) é usualmente adicionado (0,05 a 0,20%) como refinador de grão para todas as ligas de fundição em areia e em moldes permanentes; dispensável na fundição sob pressão pois a textura já é fina devido ao esfriamento rápido. Resulta maior resistência à tração e ductilidade, e menor condutividade térmica.

Boro (B). Empregado em pequeno teor (até 0,01%) com o titânio torna mais duradouro o efeito deste em re-fusões e beneficia a liga da mesma forma que o titânio.

Ferro (Fe) algumas vezes é adicionado para reduzir a contração, age também como refinador de grãos, menos nas ligas de silício fundidas em areia. Nas fundidas sob pressão diminui o agarramento ao molde. O teor de ferro deve ser controlado e geralmente varia de 0,15 a 1,2%.

Manganês (Mn) atua como refinador de grãos para reduzir a contração.

Acrescentado às ligas de cobre ou de silício melhora a resistência à tração das peças em alta temperatura. Contudo, o Mn deve ser controlado em combinação com Fe, pois o efeito pode ser o contrário, isto é, a formação de grandes partículas do constituinte primário que trariam redução na resistência e nenhum benefício da adição desse elemento.

Cromo (Cr) é primariamente, um refinador de grão, empregado com as adições de titânio (Ti). É também empregado para reduzir trincas de tensões ou corrosão de tensões em certas ligas de fundição como Al-Zn-Mg. Em algumas ligas pode ser empregado para melhorar a resistência em temperaturas elevadas.

Níquel (Ni) melhora a estabilidade dimensional e a resistência em temperaturas elevadas. É sempre usado em combinação com outros elementos de liga. Tem particular emprego em ligas para cabeças de cilindro de motores de avião resfriados pelo ar e pistões para motores de combustão interna. Convém, todavia, observar que 5% de Ni produz alta contração. As ligas comuns empregam o níquel máximo na faixa de 0,5 a 3%.

Zinco (Zn) quando adicionado em quantidades grandes torna a liga muito frágil a quente e produz alta contração. Para obtenção das características máximas é necessária uma fusão muito rápida. Adição de zinco, especialmente em combinação com magnésio, produz boa resistência ao impacto, alta resistência à tração e excelente ductilidade.

Pequenas quantidades de zinco em ligas com cobre contribuem para uma melhor usinabilidade.

Os limites da composição química de uma liga de alumínio A380.0 são mostrados no quadro 02. Esta liga é muito utilizada na indústria automobilística em várias aplicações. As referências para os limites foram extraídos das normas ISO3522 e da AA.

Elemento	Unidade	ISO3522	AA
Silício	% massa	7.5...9.5	7.5...9.5
Ferro	% massa	1.3 max	1.3 max
Cobre	% massa	2.5...4.0	3.0...4.0
Manganês	% massa	0.6 max	0.50 max
Magnésio	% massa	0.3 max	0.10 max
Cromo	% massa	—	—
Níquel	% massa	0.5 max	0.50 max
Zinco	% massa	1.2 max ^(Nota 1)	3.0 max
Chumbo	% massa	0.3 max	—
Estanho	% massa	0.2 max	0.35 max
Berílio	% massa	—	—
Titânio	% massa	0.2 max	—
Outros ^(Nota 2)	cada	—	—
	total	0.5 max	0.50 max

Nota 1: Nível de zinco acima de 3.0 % é permitido para a liga A380.0. da Aluminium Assoc

Note 2: Resíduos seguem especificação da AA (Associação do Alumínio)

Quadro 02: Limites da composição química em % de massa da liga A380.0

2.3 ZINCO

O zinco é encontrado em todo o meio ambiente (ar, água e solo) e caracteriza-se pela sua alta resistência à corrosão, o que permite o seu emprego como revestimento protetor de vários produtos. Sua grande facilidade de combinação com outros metais permite o seu uso na fabricação de ligas, principalmente os latões e bronzes (ligas cobre-zinco) e as ligas zamac (zinco-alumínio-magnésio).

O zinco é um metal de cor branco-azulada, possui uma estrutura cristalina hexagonal compacta (HC), densidade: $7,14 \text{ g/cm}^3$, ponto de fusão: 419°C (à pressão de 760mm de Hg) e ponto de ebulição a 920°C (BALANÇO, 2001).

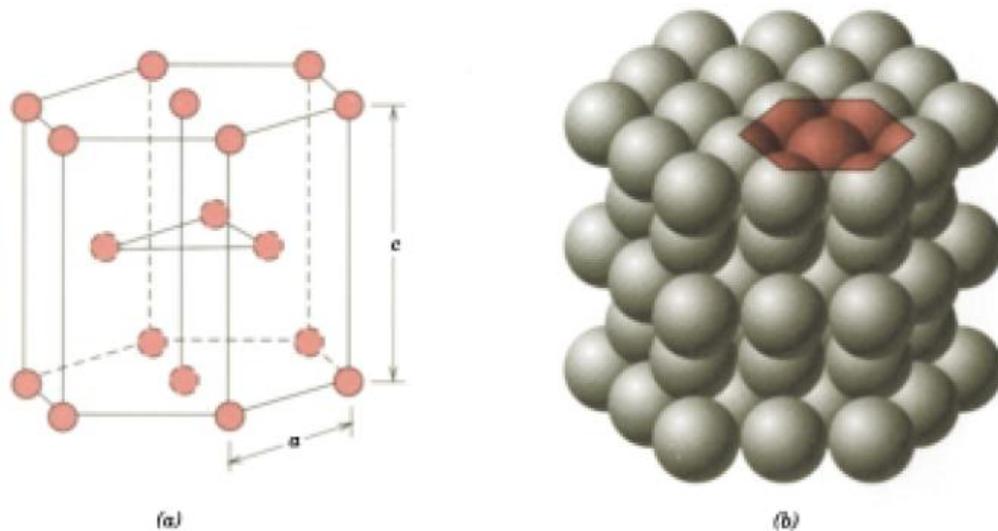


Figura 05: Estrutura cristalina hexagonal compacta: (a) célula unitária com esferas reduzidas (a e c representam os comprimentos das arestas curta e comprida, respectivamente) e (b) agregado de muitos átomos

Seu baixo ponto de fusão facilita a moldagem em peças injetadas e centrifugadas. Seu baixo ponto de ebulição facilita a sua extração e refino e, por ser maleável entre 100 e 150°C , pode ser laminado em chapas e estirado em fios.

Pela sua propriedade anti-corrosiva, o zinco tem larga aplicação na construção civil, na indústria automobilística e de eletrodomésticos, destacando-se o seu uso na galvanização como revestimento protetor de aços estruturais, folhas, chapas, tubos e fios por meio da imersão ou eletrodeposição. O aço galvanizado é simplesmente aço comum ao

carbono que foi revestido por uma fina camada de zinco que será corroído preferencialmente, protegendo o aço. (CALLISTER, 2002)

O zinco é classificado em duas grandes famílias: o zinco primário e zinco secundário (obtido através de sucatas e resíduos). O zinco primário representa de 80,0% a 85,0% da produção atual brasileira (BALANÇO, 2001), e o seu principal processo de produção é o eletrolítico, seguido de um processo de eletrólise, na qual o eletrólito, rico em zinco, entra em células eletrolíticas com anodos de ligas de zinco e catodos de alumínio. O zinco se deposita nos catodos de alumínio, sendo periodicamente retirado para posterior fusão e transformação em placas.

Entre os metais não ferrosos o consumo mundial de zinco só é superado pelo alumínio e o cobre (BALANÇO, 2001). Em alguns campos de aplicação, o alumínio e o plástico apresentam-se como substitutos do zinco.

2.3.1 Ligas de zinco

As ligas de zinco são extensivamente usadas em processos de fundição por injeção (ou fundição sob pressão). As peças provenientes destes processos alimentam os mercados de eletrodomésticos, indústria de material bélico e automobilístico. Os latões e bronzes (ligas cobre-zinco com teores de zinco entre 5,0 e 40,0%) são usados em acessórios elétricos, além de outras aplicações.

As ligas de zinco, também conhecidas como “*zamac*”, são ligas compostas por 4 (quatro) componentes básicos para sua formação (liga): Zinco (Zn), Alumínio (Al), Magnésio (Mg) e Cobre (Cu), dentre as quais, de acordo com especificações, formam variadas ligas a serem usadas nos mais diversos ramos de atividade.

Dentre todas as ligas de metais não ferrosos, as ligas de zinco possuem maior utilização, devido às suas propriedades físicas, mecânicas e à fácil capacidade de revestimento por eletrodeposição. O seu baixo ponto de fusão (aproximadamente 400°C) (ASM, 1992) permite uma maior durabilidade do molde, permitindo uma maior produção de peças fundidas em série.

Ligas de zinco são utilizadas como materiais para fundição sob pressão a mais de 80 anos. Estas ligas são caracterizadas por suas propriedades mecânicas, aliadas a baixos custos de fabricação.

As principais ligas de zinco para processos de fundição podem ser classificadas conforme abaixo (ASM, 1992):

Liga de zinco número 2: é a única liga que é utilizada para fundição por gravidade, especialmente para a conformação de metais ou ferramentas de injeção de plásticos. Esta liga oferece a mais alta resistência e dureza da família. Entretanto, devido ao seu alto teor de Cobre (3%) suas propriedades tendem a ser alteradas através da ação do tempo. Estas alterações incluem pequenas deformações dimensionais, menor alongamento e redução na resistência ao impacto (a níveis similares a ligas de Alumínio). Embora a liga de zinco número 2 exiba excelente maleabilidade para a fundição tem sido mais utilizado quando da necessidade de peças de desgaste, pois suas características de fluência, resistência mecânica e dureza não são afetadas com o tempo.

Liga de zinco número 3: é normalmente a primeira escolha quando o zinco é considerado para o processo de fundição sob pressão. Seu excelente balanço entre as desejadas propriedades mecânicas com excelente maleabilidade para a fundição aliadas a longa estabilidade dimensional são suas principais características que fazem desta liga a mais popular entre os usuários. Adicionalmente, esta liga oferece excelentes características de acabamento tais como eletrodeposição, pintura e tratamentos de cromatização.

Liga de zinco número 5: um pouco mais resistente e duro do que a liga de zinco 3. Entretanto estas vantagens são prejudicadas pela menor ductibilidade, afetando a deformabilidade do material quando de processos secundários de dobramento, etc. Esta liga contém uma adição de 1% de Cobre, responsável por estas propriedades. Apresenta excelente maleabilidade para a fundição, assim como, melhor resistência à fluência quando comparada à liga de zinco número 3. A liga de zinco número 5 é indicada quando da necessidade de ligas com maiores resistências mecânicas. Suas propriedades relativas ao acabamento de peças são comparáveis à liga de zinco número 3.

Liga de zinco número 7: é uma modificação da liga de zinco número 3, na qual uma pequena quantidade de magnésio é adicionada a fim de aumentar a fluidez do material. Por outro lado, para se evitar problemas de corrosão intergranular, uma pequena adição de níquel é realizada.

Apresenta uma melhor ductibilidade do que a liga de zinco número 3, sendo as outras propriedades similares. Esta liga é popular para aqueles casos especiais onde componentes com finas espessuras devem ser fundidos, apresentando também uma boa qualidade superficial.

As características do produto e o efeito do emprego dos vários elementos de liga são sintetizados a seguir (MORGAN, 1985)

Alumínio (Al) é o principal elemento de liga e tem o maior efeito no aumento da resistência e na redução dos tamanhos de grãos. Se presente em excesso de 4.3 por cento, a resistência ao impacto é reduzida, e a 5 por cento a liga se torna frágil. Abaixo de 3.7 por cento a facilidade de injeção da liga e as propriedades mecânicas se deterioram. A composição química deve atender aos limites especificados. Com a presença de alumínio, o ataque no aço é reduzido aumentando a vida útil do ferramental nos processos de injeção.

Cobre (Cu) tem a tendência de aumentar dureza e a resistência a tração, porém reduz a resistência ao impacto e causa alguma instabilidade dimensional no envelhecimento. Como consequência a liga de zinco número 3 é utilizada para a maioria das aplicações, e a liga de zinco número 5 reservada para as aplicações onde maiores resistências mecânicas, maior dureza e processabilidade são solicitadas.

Magnésio (Mg) efetua um importante papel na redução da corrosão intercrystalina, se presente acima de 0.06 por cento, resistência ao impacto e ductibilidade serão desfavoravelmente afetados e acarretará fragilidade a quente (hot shortness).

Ferro (Fe) tem pouco efeito nas propriedades das ligas de zinco para injeção. Aproximadamente 0.02 por cento é mantida em solução sólida, mas acima desta concentração o ferro tende a formar um composto duro com o alumínio presente e pode causar problemas no maquinário.

Chumbo (Pb) e Estanho (Sn) acima dos limites dados nas especificações para qualquer um dos elementos são altamente perigosos, corrosão em atmosferas úmidas podem espalhar rapidamente ao longo das extremidades dos grãos, onde as impurezas estão concentradas, e a resistência da peça fundida é seriamente reduzida.

As quantidades que causam este efeito são tão pequenas que, na área de fundição, precauções extremas são essenciais para evitar contaminações, e somente refugos de alta qualidade devem ser retornados para a fundição.

Cádmio (Cd) tem um efeito prejudicial nas propriedades mecânicas e não deve exceder 0.005 por cento, portanto é importante manter os níveis abaixo dos limites especificados.

Os limites da composição química para a liga de zinco número 5, oriundas da literatura, apresentam os valores no quadro 03 e foram obtidos da norma ASTM B86.

Estes valores serão utilizados como referência nos estudos que serão mostrados nos capítulos posteriores do presente trabalho.

Elemento	Unidade	ASTM B86
Alumínio	% massa	3.5...4.3
Cobre	% massa	0.75...1.25
Magnésio	% massa	0.030...0.080
Ferro	% massa	0.1 max
Chumbo	% massa	0.005 max
Cádmio	% massa	0.004 max
Estanho	% massa	0.003 max

Quadro 03: Limites da composição química em % de massa da liga de zinco número 5

2.4 POLIAMIDAS

As poliamidas (PA), ou comumente chamados de náilons (derivado do inglês “*nylon*”), são termoplásticos processados por fusão, cuja cadeia principal incorpora um grupo de repetição amida. As poliamidas são plásticos estruturais e possuem uma boa capacidade para suportar cargas e temperaturas elevadas, boa tenacidade, baixo coeficiente de atrito e boa resistência química.

O desenvolvimento inicial das poliamidas se deve principalmente ao trabalho de W.H.Carothers e seus colaboradores nos E.U.A., que sintetizaram a primeira poliamida 6.6 em 1935, a partir da policondensação de hexametileno diamina com ácido adipico. A produção comercial para aplicação de fibras têxteis foi iniciada pela Du Pont Co. em 1940, enquanto o plástico para moldagem, apesar de ser produzido em 1941, tornou-se popular somente em 1950 conforme já mencionado na introdução do trabalho (DU PONT, 2008).

Para evitar os direitos das patentes da Du Pont, os químicos alemães iniciaram investigações independentes em fins dos anos 1930 com os possíveis polímeros sintéticos têxteis, e o resultado foi o lançamento bem sucedido da poliamida 6.

Juntas as poliamidas 6.6 e 6 são responsáveis pela maior parte da produção, que incluem as poliamidas 6.10, 11, 12 e outras. A produção das poliamidas para aplicações em plásticos é de ordem de 12% da produção total das poliamidas, sendo que a maior parte da produção se destina para o setor têxtil (WIEBECK, 2005).

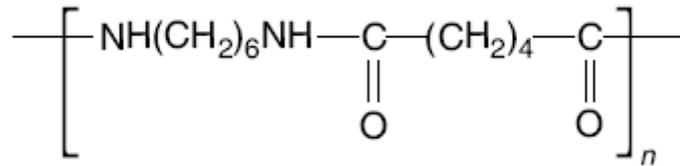


Figura 06: Estrutura da Poliamida 6.6

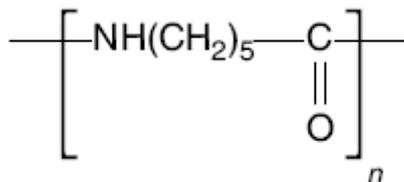


Figura 07: Estrutura da Poliamida 6

As poliamidas 6.6 e 6 e os seus tipos reforçados com fibras de vidro, e em menor escala as demais poliamidas, são considerados os principais termoplásticos de engenharia. Evidentemente, as poliamidas devem a sua importância não apenas as suas boas propriedades físico-mecânicas, mas também à economia de grande escala de produção dos seus monômeros empregados basicamente para fins têxteis, o que tornam estes termoplásticos competitivos em custo/quilograma de resina, em relação aos metais tradicionais (aço, alumínio, bronze, etc.) que vem substituindo na área da indústria automobilística, engenharia elétrica e de eletros-domésticos, engenharia mecânica leve e de precisão, destacando-se principalmente para aplicações em engrenagens e mancais/rolamentos fabricados por processos de moldagem por injeção ou por usinagem.

Apesar das poliamidas 6 e 6.6 não serem obtidas da mesma matéria-prima, as suas moléculas são bastante parecidas, diferenciando-se apenas pelo número de átomos de carbono presentes na molécula. O grupo funcional amida (CONH) é característico para todas as poliamidas (WIEBECK, 2005).

A poliamida 6 é obtida a partir da caprolactama, que é um composto orgânico que possui seis átomos de carbono na sua composição, utilizando-se a polimerização com abertura de anel.

Nesta polimerização parte-se de um monômero na forma de um anel. Através da abertura deste anel, tem-se a geração de uma bifuncionalidade que, se reagir consigo mesma muitas vezes, formará uma cadeia polimérica. Evidentemente, neste tipo de polimerização não há a formação de subprodutos durante a reação (CANEVAROLO, 2002)

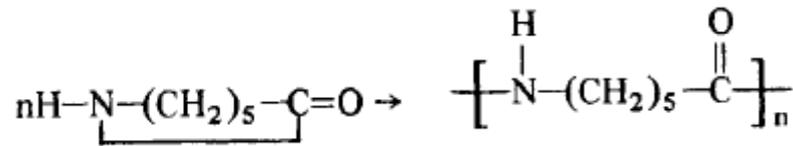


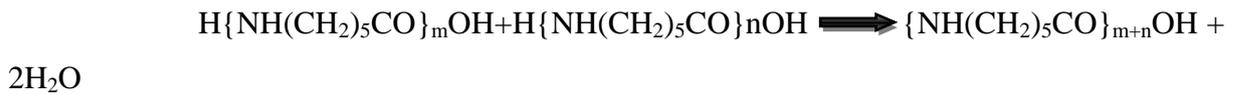
Figura 08: Poliamida 6, polímero que resulta de uma reação de abertura de anel

A polimerização da caprolactama para a produção da poliamida 6 ocorre somente com a presença de água, à temperaturas acima de 200° C, pela abertura de anel de lactama e crescimento da cadeia por união dos grupos funcionais (WIEBECK, 2005).

Hidrólise



Condensação



Adição



A nomenclatura utilizada para classificar as poliamidas consiste em numerar os átomos de carbono presentes na estrutura química dos monômeros. Um único número indica o número de átomos de carbono no amino-ácido ou lactama. Dois números indicam uma poliamida feita a partir de uma diamina e um ácido dibásico, onde o primeiro número representa o número de átomos de carbono na cadeia da diamina e o segundo, o número de átomos de carbono do ácido dibásico (CHANDA, 2007).

Com exceção dos tipos especiais transparentes, as poliamidas alifáticas de interesse comercial são termoplásticos semicristalinos, contendo grupos amida (-CONH) polares regularmente espaçados na cadeia polimérica, de forma que os polímeros cristalizam com alta atração intermolecular.

A estrutura cristalina depende do arranjo das cadeias moleculares, se o arranjo for altamente ordenado tridimensionalmente, o polímero é dito ter um alto grau de cristalinidade. A estrutura cristalina das poliamidas depende, em primeira instância, da concentração dos grupos amida e da simetria molecular. As unidades repetitivas mais curtas entre os grupos amida (-CONH-) permitem as cadeias poliméricas se disporem numa

conformação zig-zag planar compacta com ligações hidrogênio (pontes de hidrogênio) entre elas, tal como representado no diagrama esquemático abaixo (SMITH, 1998).

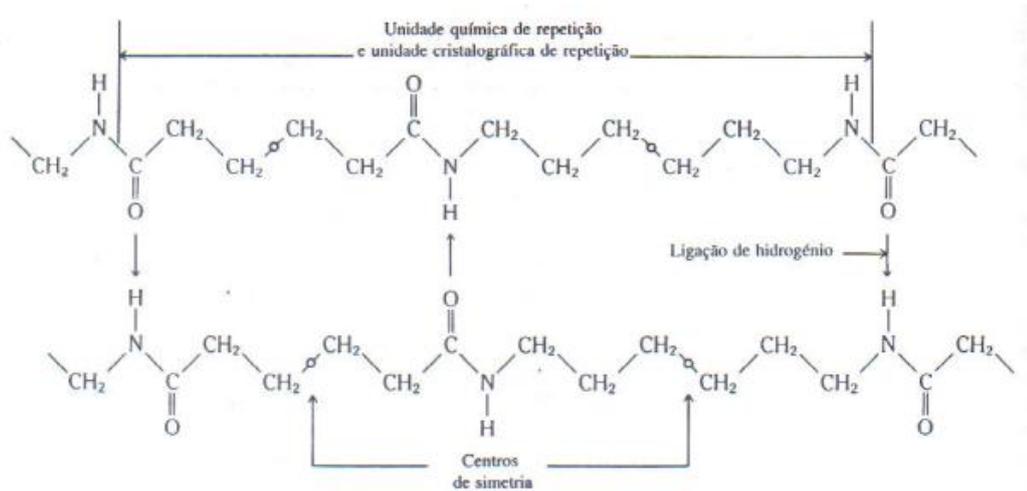


Figura 09: Representação esquemática das ligações de hidrogênio entre duas cadeias moleculares.

O alto grau de cristalinidade das poliamidas requer o alinhamento paralelo das cadeias e uniformidade na maneira em que o hidrogênio ligado ao nitrogênio (ponte de hidrogênio) se dispõe.

A combinação das altas forças intermoleculares, devido à regularidade nas regiões cristalinas e ligações de hidrogênio, e a flexibilidade das regiões amorfas dos segmentos alifáticos da cadeia transformam as poliamidas em polímeros altamente tenazes, acima das suas temperaturas de transição vítrea (T_g). A alta atração intermolecular resulta em altos pontos de fusão cristalina, porém no estado fundido, o polímero apresenta baixa viscosidade devido à alta flexibilidade da cadeia polimérica e baixo peso molecular (PM) à temperatura de processamento.

A influência do grau de cristalinidade das poliamidas é marcante nas propriedades físicas do material. No entanto, o efeito da cristalinidade dificilmente pode ser discutido independentemente da absorção de água pelas poliamidas.

Devido à presença dos grupos amidas (-CONH) as poliamidas absorvem umidade do ambiente, causada pela natureza higroscópica das ligações de hidrogênio que se transformam em hidroxilas, eventualmente alcançando um nível que esta em equilíbrio com a umidade relativa da atmosfera. A figura 10 mostra esta relação para diferentes poliamidas.

Desde que mudanças dimensionais possam ocorrer como resultado de absorção de água, este efeito deve ser considerado quando precisão dimensional é requerida em uma aplicação específica (CHANDA,2007).

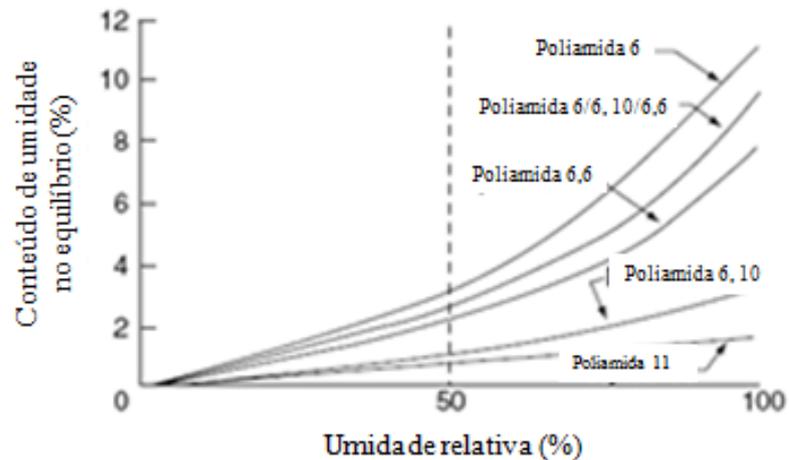


Figura 10: Efeito da umidade relativa na absorção de água no equilíbrio das poliamidas

A presença da água funciona como plastificante no polímero, separando as cadeias moleculares e diminuindo a cristalinidade e a temperatura de transição vítrea (T_g) do polímero de um valor de ordem de $+ 50^{\circ}\text{C}$ para 0°C , e conseqüentemente, reduzindo de um lado a rigidez e a resistência ao impacto e tenacidade dos mesmos, por exemplo, o módulo de Young para as poliamidas 6 e 6.6 decresce aproximadamente 40 por cento com a absorção de 2 por cento de umidade (CHANDA, 2007).

A absorção de água interfere na cinética de cristalização das poliamidas. Como a temperatura de transição vítrea (T_g) da PA 6.6 rigorosamente seco é de ordem 50°C , e com absorção normal de umidade este valor é reduzido para aproximadamente abaixo da temperatura ambiente, isto influi na cinética de cristalização pós-moldagem que prossegue muito lentamente, com resultantes efeitos de encolhimento pós-moldagem nos moldados, que irão estabilizar somente num período não inferior a dois anos. No caso da poliamida 6 este efeito negativo é menos marcante (WIEBECK, 2005).

A interação entre o grau de cristalinidade e teor de umidade do polímero é um fator crítico, visto que estes dois fatores apresentam efeitos opostos nas propriedades físicas, químicas e mecânicas das poliamidas. De um lado o aumento na cristalinidade significa

superiores propriedades de resistência (tração, rigidez, fluência), alta dureza e resistência à abrasão, boa estabilidade dimensional (superior termo-distorção, menor absorção de água e encolhimento “pós-moldagem”) boas propriedades elétricas e químicas. Do outro lado, a absorção de água reduz o grau de cristalinidade, deteriora as acima referidas características do polímero, porém apresenta vantagens de superior tenacidade e resistência ao impacto das poliamidas. Visto que a poliamida 6 e poliamida 6.6 somente atingem tenacidade ótima após estabilização com 1-2% de umidade, seus produtos não podem ser colocados imediatamente em serviço(WIEBECK, 2005).

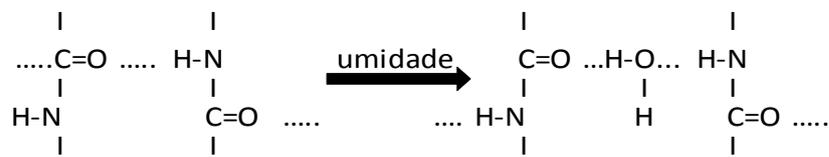


Figura 11: Esquema de absorção de água pelas poliamidas

A molécula de água, ao ser absorvida pelo polímero, aumenta o espaçamento entre as moléculas poliméricas, aliviando as tensões intermoleculares (WIEBECK, 2005).

A incorporação de reforços de fibras e esferas de vidro e outras cargas inorgânicas aumentam substancialmente as características de resistência mecânica das poliamidas 6.6 e 6. (CHANDA, 2007).

A alta densidade de energia coesiva e estrutura cristalina das poliamidas resultam em boa resistência química, sendo que quanto maior o grau de cristalinidade mais alta a resistência das poliamidas ao ataque químico (WIEBECK, 2005).

As propriedades das poliamidas 6.6 são levemente superiores as da poliamida 6, quanto à resistência mecânica (tração, módulo, fluência), resistência térmica e a absorção de água. Entretanto, a poliamida 6 apresenta vantagens de menor dificuldade no processamento, devido ao seu ponto de fusão inferior e ao fato de apresentar menor encolhimento pós-moldagem (WIEBECK, 2005).

Tabela 01: Propriedades das poliamidas 6 e 6.6 (MARK, 1999)

PROPRIEDADE	PA 6	PA 6.6
Densidade ASTM 792 (g/cm ³)	1,13	1,14
Ponto de fusão ASTM D789 (°C)	219	263
Resistência à tração ASTM D638 (MPa)	79	82,7 - 90,3
Módulo de flexão ASTM D790 (MPa)	2829	2827 - 2964
Absorção de água ASTM D570 - Saturação (%)	9,5	8,5

Uma das principais características das poliamidas está na sua excelente resistência à abrasão e auto-lubricidade, principalmente em moldados com alto grau de cristalinidade que induz alta dureza superficial. Entretanto, os coeficientes de atrito das poliamidas são levemente inferiores as dos poliacetais, devido a maior plastificação das poliamidas com absorção de umidade.

Outra importante característica é a sua boa resistência à fadiga dinâmica e ao impacto repetitivo, devido à tenacidade do polímero, e em consequência as poliamidas 6 e 6.6 apresentam superiores resistências à fadiga dinâmica e impacto repetitivo em relação ao policarbonato (de resistência ao impacto e rigidez superiores), devido à natureza cristalina das poliamidas em relação à estrutura essencialmente amorfa do PC.

A processabilidade das poliamidas requer cuidados especiais devido aos seguintes fatores: natureza higroscópica da resina; altos pontos de fusão cristalina e baixa viscosidade na temperatura de processamento; tendência a oxidar à temperaturas elevadas de processamento; alto grau de cristalinidade e, conseqüentemente, extensivo encolhimento no resfriamento.

Estas características requerem cuidados especiais por parte dos processadores, como estufagem prévia dos grânulos a temperaturas entre 70°C e 90°C. As injetoras devem ser projetadas para evitar “pontos mortos” no fluxo do polímero fundido que levam à oxidação do material. Devido à baixa viscosidade, os bicos das injetoras devem apresentar sistemas de bloqueio para evitar vazamentos. Além disso, altas pressões de empacotamento devem ser mantidas para minimizar o efeito do alto grau de contração do polímero no resfriamento e compensar as perdas volumétricas.

As temperaturas do molde e os tempos de resfriamento nos ciclos de moldagem das poliamidas são críticos, visto que o grau de cristalinidade depende da taxa de resfriamento. Para reduzir os ciclos de resfriamento e ao mesmo tempo atingir alta cristalinidade nos moldados, as resinas de poliamida 6 e 6.6 são fornecidas com agentes de

nucleação que precipitam rapidamente um maior número de “esferulitos” de dimensões menores e de características morfológicas superiores, resultando em melhores propriedades de resistência nos produtos acabados. Existem vários tipos de agentes de nucleação empregados, geralmente em pequenas porcentagens (aproximadamente 1 por cento), tais como sílica fina precipitada, poliamidas de alta massa molar ou com ligações cruzadas e outros polímeros de temperatura de fusão e textura granulométrica mais fina. Geralmente, os agentes nucleantes tais como poliamidas de ligações cruzadas, ou alta massa molar, melhoram substancialmente as propriedades físicas e mecânicas do produto final.

Após serem injetadas, as peças devem ser hidratadas para que possam adquirir todas as propriedades características da poliamida. O tempo de hidratação será determinado pelas dimensões da peça e pela temperatura da água.

Recomenda-se imersão em banhos de ambiente não oxidante, tais como ceras e óleos lubrificantes, a temperaturas entre a de fusão cristalina (T_m) e de transição vítrea (T_g) do polímero, no entanto, o custo elevado e a dificuldade de limpeza das peças fazem com que as indústrias optem pela hidratação em banho de água quente (WIEBECK,2005).

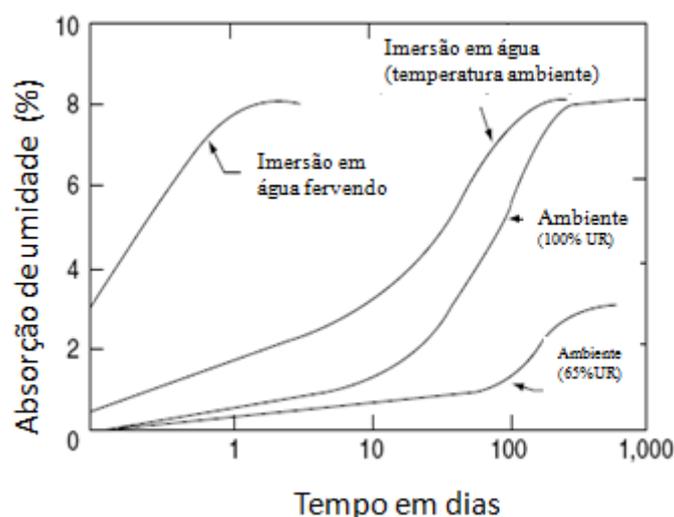


Figura 12: Efeito das condições ambientais na razão da absorção de umidade na poliamida 6.6 (CHANDA,2007)

Aplicações típicas na indústria automobilística com os tipos reforçados com fibras de vidro, incluem maçanetas, puxadores e componente de fechaduras das portas de carro. Aplicações no “compartimento do motor” incluem recipientes para água, óleo lubrificante, carcaças de filtros de gasolina, ventoinhas do radiador, caixas de água do radiador, sistemas de aquecimento/resfriamento do carro e outros, onde as excelentes

propriedades da poliamida termo-estabilizada e reforçada com fibra de vidro (30% de fibra de vidro), de alta resistência mecânica sob condições de fadiga e impacto repetitivo, à temperatura elevadas e ambientes agressivos de serviço, e relativamente baixo custo da resina, são os principais critérios para seleção do material compósito em preferência aos demais termoplásticos de engenharia (MAXWELL, 1994).

2.5 REFORÇOS

Os três principais tipos de fibras sintéticas que se usam para reforçar materiais plásticos são: as fibras de vidro, as fibras de aramida e as fibras de carbono. As fibras de vidro são de longe o reforço mais usado e mais barato (SMITH, 1998).

2.5.1 Fibras de vidro

As fibras de vidro (FV) são usadas para reforçar matrizes plásticas de modo a obter compósitos estruturais e componentes moldados. Os compósitos de matriz plástica reforçados por fibra de vidro apresentam as seguintes características favoráveis: elevada razão (quociente) resistência peso; boa estabilidade dimensional; boa resistência ao calor; às baixas temperaturas, à umidade e a corrosão; boas propriedades de isolamento elétrico; facilidade de fabricação e custo relativamente baixo.

As características desfavoráveis das fibras de vidro são difícil adesão à matriz polimérica, principalmente quando na presença de umidade, e baixa resistência à abrasão.

Diferentes composições de vidros já foram utilizados para produzir fibras, o mais comum é baseado na utilização de sílica (SiO_2) com adição de óxidos de cálcio, boro, sódio, ferro e alumínio.

Os dois mais importantes tipos de vidro utilizados na produção de fibras de vidros para compósitos são o vidro *E* (elétrico) e o vidro *S* (elevada resistência mecânica).

O vidro *E* é o mais usado para obtenção de fibras contínuas. Basicamente o vidro *E* é um vidro de boro-silicato, alumínio e cálcio isento, ou com muito baixos teores, de

sódio e potássio. A composição básica do vidro *E* situa-se entre 52-56% SiO₂, 12-16% Al₂O₃, 16-25%CaO e 8-13% B₂O₃. Logo após a fabricação, o vidro *E* apresenta uma resistência à tração de 3,4 GPa, um módulo de elasticidade de 72,3GPa e densidade de 2,54g/cm³ (SMITH, 1998).

O vidro *S* tem uma razão de resistência/peso mais elevada, e é mais caro do que o vidro *E*, sendo geralmente utilizado em aplicações militares e aeroespaciais. A resistência à tração do vidro *S* é superior a 4,4 GPa e o seu módulo de elasticidade é aproximadamente 85,4 GPa. O vidro *S* tem uma composição do tipo 65% SiO₂, 25% Al₂O₃ e 10% MgO (SMITH, 1998) e é mais utilizado em aplicações especiais onde a necessidade do módulo maior justifica o seu maior custo.

A resistência e o módulo da fibra de vidro é determinada primariamente pela estrutura tridimensional dos óxidos constituintes. Uma idéia da estrutura amorfa pode ser obtida através da figura 13, que mostra uma representação esquemática da estrutura de um vidro sódio silicato. Estruturalmente ela consiste em uma estrutura tridimensional que é gerada quando todos os átomos de oxigênio localizados em vértices, em cada tetraedro, são compartilhados por tetraedros adjacentes, ou seja, átomos de oxigênio em volta de um átomo de silício e que são ligados uns aos outros por fortes ligações covalentes. Os íons de sódio formam ligações iônicas com os átomos de oxigênio e não são ligadas diretamente a rede. A estrutura da rede e a força individual das ligações podem variar conforme a adição de outros óxidos metálicos e com isso é possível produzir fibras de vidro com diferentes propriedades químicas e físicas. Como consequência direta da estrutura da rede tridimensional as propriedades das fibras de vidro são isotrópicas (HULL, 1990)

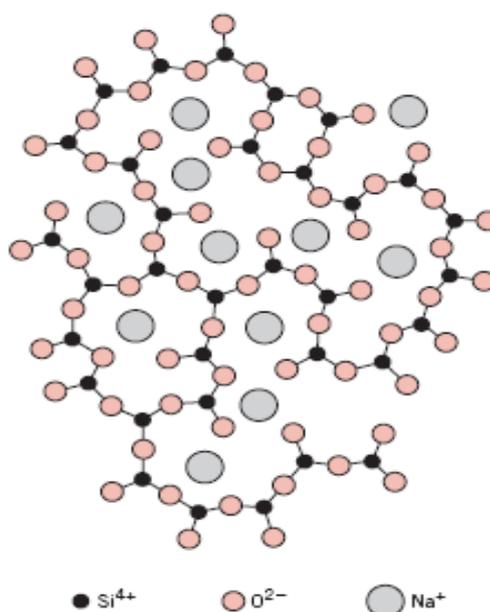


Figura 13: Representação esquemática do posicionamento dos íons em um vidro

Na fabricação das fibras de vidro, os vários ingredientes da formulação do vidro, são misturados a seco e fundidos em um forno refratário a aproximadamente 1370 °C. O vidro fundido escoava lentamente, por gravidade, através dos orifícios de uma bucha de platina e é estirado em filamentos de aproximadamente 10 µm de diâmetro. Uma camada protetora é então aplicada a cada filamento individualmente, antes deles serem agrupados juntos em um fio que é enrolado em um carretel. A camada de proteção é uma mistura de lubrificantes (que previnem a abrasão entre os filamentos), agentes anti-estáticos (que reduzem o atrito estático entre os filamentos) e um ligante, que facilita a junção dos filamentos para a formação do fio). Eventualmente a camada de proteção pode conter pequenas porcentagens de um agente de acoplamento, que promova a adesão entre as fibras produzidas e a matriz específica para a qual essas fibras estão sendo fabricadas.

2.6 COMPÓSITOS TERMOPLÁSTICOS

Quando avaliamos criteriosamente o desempenho mecânico de termoplásticos para fins de seleção de materiais adequados à fabricação de peças técnicas para aplicações de engenharia, às vezes defrontamos com dois fatores aparentemente limitantes na utilização destes materiais em relação a outros materiais tradicionais como os metais:

- manutenção da rigidez e resistência mecânica à temperatura elevadas de serviço e por períodos longos sob carregamento mecânico.
- a relativamente baixa tenacidade e resistência ao impacto da grande maioria de materiais termoplásticos.

Ambos os problemas tem sido enfrentados com sucesso e com soluções das mais variadas possíveis. O problema da relativa fragilidade mecânica de plásticos rígido-frágeis pode ser resolvido através de processos de tenacificação (isto é, aumento de tenacidade) dos mesmos pela incorporação de aditivos elastoméricos ou pela composição dos mesmos com outros plásticos mais tenazes através da técnica de blendas poliméricas.

As possíveis soluções para a melhoria na rigidez e resistência mecânica de termoplásticos podem ser classificadas em três categorias:

- pela utilização criteriosa dos conceitos de produto (i.é, projetos de formato e dimensionamento estrutural) para peças técnicas, explorados através de fabricação de painéis/laminados ocios por processos de moldagem à sopro e painéis sanduíche e moldados integrais de espumas estruturais, ou pela incorporação de elementos estruturais tais como nervuras e costelas de reforço.

- pela técnica de fabricação de blendas poliméricas (exemplos: ABS/PC, PA/PPO, etc.), incluindo aqui os compósitos moleculares obtidos pela mistura de termoplásticos de engenharia com polímeros líquido-cristalinos (LCP's).

- pela incorporação de cargas minerais e fibras de altos módulos e resistência na matriz polimérica.

A terceira opção, neste caso sendo objeto de estudo desta dissertação, para analisar de forma geral as principais vantagens e limitações advindas do emprego de fibras de alto módulo para reforço nas propriedades mecânicas de termoplásticos utilizados para aplicações de engenharia na indústria automobilística.

A eficiência de reforço mecânico obtido depende, entre outros fatores, da escolha do elemento de reforço. De forma geral, as fibras de vidro (FV), carbono, aramida e algumas cargas minerais reforçantes tais como mica, wolastonita e talco, apresentam desempenhos superiores em compósitos poliméricos, em relação a outras cargas como os carbonatos de cálcio natural e precipitado, caulim e sílica. Esta diferença na escala de reforço das propriedades mecânicas dos plásticos tem levado a classificação das cargas minerais e fibras de alto módulo da seguinte maneira na literatura especializada (WIEBECK, 2005):

Fibras de Reforço: as fibras de alto módulo e resistência tais como as fibras de vidro, carbono, aramida e grafite.

Cargas Reforçantes: alguns minerais de estrutura fibrosa/acicular ou lamelares tais como mica, wolastonita e alguns tipos de talco e caulim (também flocos de vidro).

Cargas de Enchimento: cargas minerais ou sintéticas de partículas com formato esferoidal como CaCO_3 natural e precipitado, talco, caulim, sílica, quartzo, alumina tri-hidratada, feldspato e esferas de vidro; onde um dos objetos principais da carga é o de funcionamento como um “extensor” de baixo custo para as resinas de plásticos.

A incorporação de partículas inorgânicas de alto módulo numa matriz polimérica é sempre encarada com objetivos funcionais dos mais variados, e, portanto, é comum atualmente substituir o termo “carga de enchimento” por “cargas funcionais”. De qualquer maneira, um limite bem definido entre estes termos nem sempre é preciso ou mesmo esclarecedor.

De forma geral, as principais vantagens na utilização de fibras e cargas reforçantes em termoplásticos podem ser resumidas da seguinte maneira:

- aumento substancial no módulo de elasticidade/rigidez do compósito.
- aumento expressivo na resistência ao impacto do compósito, dependendo do tipo de carga e matriz polimérica em questão.
- melhoria substancial na resistência à fluência (isto é, deformação lenta), alternando às vezes levemente as características viscoelásticas da matriz polimérica.
- melhoria na resistência mecânica a longo prazo (durabilidade e resistência e resistência à fadiga), dependendo do tipo de reforço e da natureza das interações na interface polímero-reforço.
- aumento na estabilidade dimensional, redução da expansão térmica e encolhimento de moldados.
- modificação nas características reológicas, elétricas e de permeabilidade dos compósitos.

Nos termoplásticos reforçados temos três elementos básicos que compõem o compósito polimérico: a fibra ou carga mineral de reforço, a matriz polimérica e a interface polímero-reforço. Cada um destes três elementos deve apresentar características apropriadas e funcionar tanto individualmente como coletivamente, no sentido de se atingir a máxima eficiência de reforço das propriedades desejadas no compósito. Em termos comparativos, a matriz polimérica é o componente de relativamente baixa rigidez e resistência, razoavelmente tenaz ou dúctil, de baixa densidade e coeficiente de expansão térmica superior ao do componente de reforço, que é de alto módulo e resistência e normalmente frágil. Portanto, é a fibra ou reforço mineral que deve, idealmente, suportar a maior parte da carga mecânica ou

tensão aplicada ao sistema, enquanto é função da matriz polimérica transmitir e distribuir as tensões para as fibras ou partículas de reforço individualmente. Este é o princípio básico que determina a eficiência de reforço de compósitos poliméricos, desde que a adesão interfacial polímero-reforço seja mantida integralmente (CALLISTER, 2002).

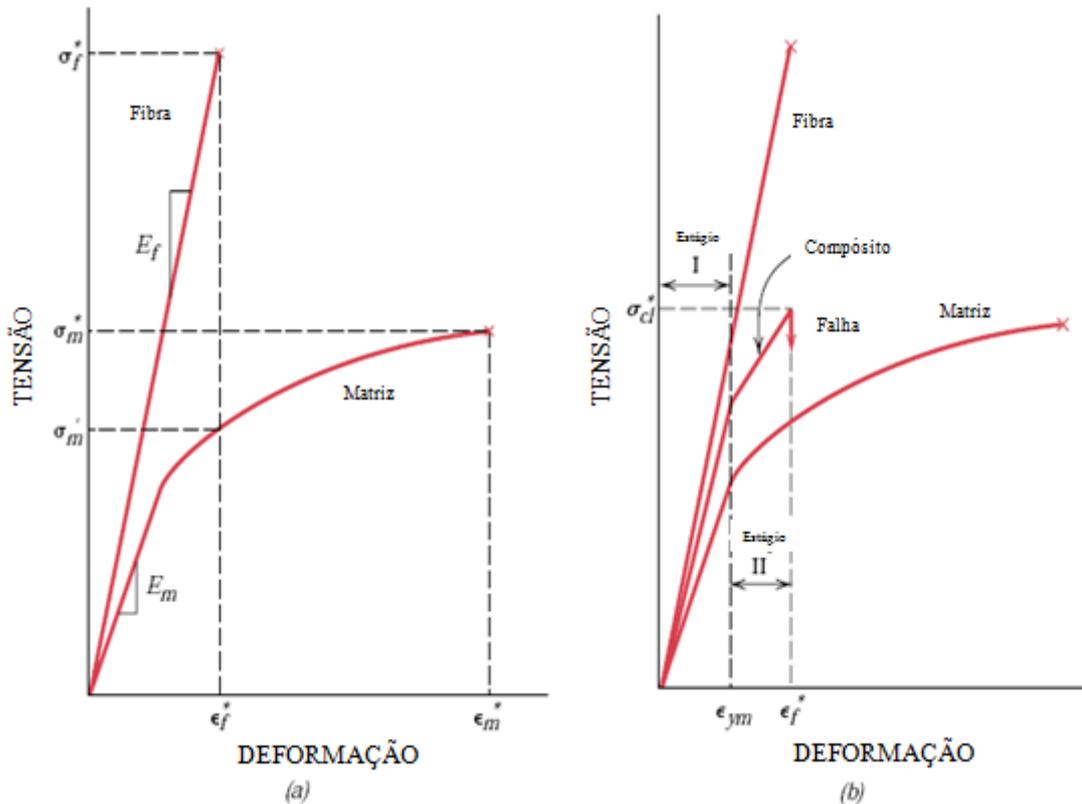


Figura 14: Curva esquemática tensão-deformação: (a) para materiais com fibra frágil e matriz dúctil. (b) para um compósito reforçado com fibras alinhadas que está exposto a uma tensão uniaxial aplicada na direção do alinhamento

A interface polímero-fibra ou reforço mineral é o fator crítico que determina até que ponto as propriedades mecânicas em potencial do compósito serão atingidas e mantidas durante seu uso em serviço. As tensões localizadas se concentram normalmente na ou próximo à interface e dependendo da natureza das interações na interface entre o polímero e o elemento de reforço, estas tensões podem funcionar como um foco para falha prematura do compósito. A interface deve, portanto, apresentar características físicas e químicas adequadas para promover uma eficiente transferência de tensão da matriz para o elemento de reforço.

Produtos para melhorar as propriedades de adesão na interface são chamados agentes de acoplamento; eles compatibilizam química e fisicamente os componentes do

compósito, pois apresentam características bi ou multifuncionais. Agentes de acoplamento são usados para melhorar a resistência na interface matriz/fibra, através de ligações físicas e químicas, assim como servem para proteger as superfícies das fibras das condições adversas do ambiente, tais como umidade e fluidos reativos (que podem se difundir através da matriz e causar a deterioração das propriedades das fibras).

Para fibras de vidro e matrizes poliméricas usam-se compostos de silício chamados silanos ($R' - Si(OR)_3$) onde o grupo funcional R' deve ser compatível com a resina da matriz.

A superfície da fibra de vidro é tratada com o silano em solução aquosa, quando ocorre a hidrólise do agente silano. As fibras são imersas na solução aquosa de silano; formam-se ligações químicas ($Si - O - Si$), assim como ligações físicas (pontes de hidrogênio) com os grupos (OH) da superfície da fibra de vidro.



Depois de tratadas as fibras de vidro são incorporadas à matriz; o grupo funcional R' , no filme de silano formado sobre a superfície da fibra, reage com a resina formando uma reação química entre fibra e matriz polimérica.

Outras funções da matriz polimérica incluem a proteção contra abrasão das fibras/partículas da carga, como também a proteção das mesmas contra exposição à umidade e penetração de líquidos, sendo que estas funções são também promovidas pela interface através do uso de agentes de acoplamento/acoplamento interfacial. A presença do agente de acoplamento na interface pode ser a melhor maneira de assegurar otimização das propriedades físicas e químicas do compósito, como também da manutenção destas propriedades quando a exposição às intempéries e ao envelhecimento.

Resumindo, podemos dizer que as propriedades finais do compósito polimérico dependerão essencialmente de:

- propriedades características individuais dos seus componentes.
- concentração relativa dos componentes.
- natureza da interface polímero-reforço.
- eficiência do processo de composição/compostagem e de transformação em assegurar a melhor morfologia desejada no compósito final.

O principal efeito da incorporação da fibra de reforço numa matriz polimérica é o de aumentar o módulo (rigidez) e a resistência do polímero. O tratamento teórico mais

simplificado (HULL, 1999 e CHAWLA, 1998) destes efeitos é baseado na simples “Regra de Mistura”, onde em uma primeira aproximação o módulo longitudinal e a resistência à tração do compósito, na direção paralela as fibras, são dados por:

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

$$\sigma_c = \sigma_f \cdot V_f + \sigma_m \cdot (1 - V_f) \quad (2)$$

Onde, E_c , E_f e E_m são respectivamente os módulos do compósito, da fibra e da matriz polimérica, σ_c , σ_f são as resistências à tração do compósito e fibra, enquanto σ_m , é a tensão da matriz na deformação máxima da fibra e, finalmente, V_f é a fração em volume da fibra.

As equações (1) e (2) são válidas para fibras longas (ou contínuas), todas alinhadas em uma única direção e ensaiadas na direção de orientação das fibras. Porém, na prática, as fibras nem sempre estão totalmente alinhadas ou não são solicitadas na direção do alinhamento.

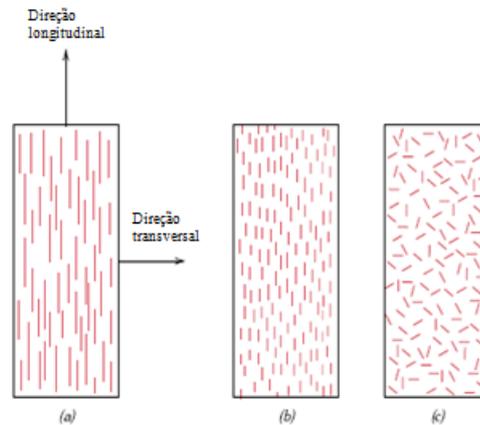


Figura 15: Representação esquemática de compósitos reforçados com fibras (a) contínuas e alinhadas, (b) descontínuas e alinhadas e (c) descontínuas e aleatoriamente orientadas

Deve-se então introduzir um fator de correção nas equações acima, η (fator de alinhamento), e as equações transformam-se em:

$$E_c = E_f \cdot V_f \cdot \eta + E_m \cdot (1 - V_f) \quad (3)$$

$$\sigma_c = \sigma_f \cdot V_f \cdot \eta + \sigma_m \cdot (1 - V_f) \quad (4)$$

Quando $\eta = 1$ as fibras estão totalmente alinhadas e testadas na direção de alinhamento e para $\eta < 1$ implica em redução do módulo do compósito (E_c) e da resistência a tração do compósito (σ_c), pois o reforço das fibras torna-se menos eficiente.

Valores para η são estipulados na literatura (HULL, 1999).

Tabela 02: Eficiência de reforço de compósitos reforçados com fibras para diferentes orientações das fibras e as várias direções de aplicação das tensões

Orientação da Fibra	Direção da tensão	η
Todas as fibras paralelas	Paralela às fibras	1
Todas as fibras paralelas	Perpendicular às fibras	0
Fibras distribuídas aleatoriamente e uniformemente dentro de um plano específico	Qualquer direção no plano das fibras	3/8
Fibras distribuídas aleatoriamente e uniformemente dentro das três dimensões no espaço	Qualquer direção	1/5

Como na prática e grande maioria das peças técnicas de termoplásticos reforçados são moldados por injeção, é importante avaliar aqui a influência de fibras curtas no processo de reforço do compósito. No caso de fibras curtas, a tensão é transferida da matriz para a fibra através do efeito de atrito e cisalhamento na interface polímero-fibra e, portanto, o comprimento real da fibra e a adesão interfacial polímero-fibra tornam-se fatores de primeira importância.

A magnitude da ligação interfacial entre as fases fibra e matriz é importante para a extensão dessa transmissão de carga. Sob a aplicação de uma tensão, essa ligação fibra-matriz cessa nas extremidades da fibra, produzindo um padrão de deformação da matriz, como está mostrado esquematicamente na figura XX; em outras palavras, não existe qualquer transmissão de carga a partir da matriz em cada extremidade da fibra.

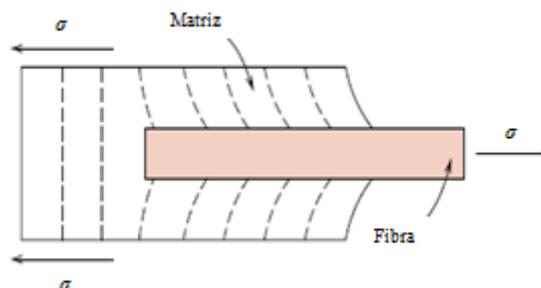


Figura 16: Padrão de deformação na matriz em volta de uma fibra que está sujeita à aplicação de uma carga de tração

Um comprimento crítico de fibra é necessário para que exista um efetivo aumento da resistência e um enrijecimento do material compósito. Esse comprimento crítico, l_c , ou razão de aspecto crítica $(l/d)_c$, depende do diâmetro da fibra, d , e da sua resistência final (ou limite de resistência à tração), σ_f^* , bem como da força da ligação entre a fibra e a matriz (ou da tensão limite de escoamento cisalhante da matriz, o que for menor), τ_c de acordo com a relação (CALLISTER, 2002).

$$l_c = \sigma_f^* \cdot d / 2\tau_c \quad (5)$$

Para várias combinações matriz-fibra de vidro, esse comprimento crítico é da ordem de um milímetro (1 mm), o que varia entre 20 e 150 vezes o diâmetro da fibra.

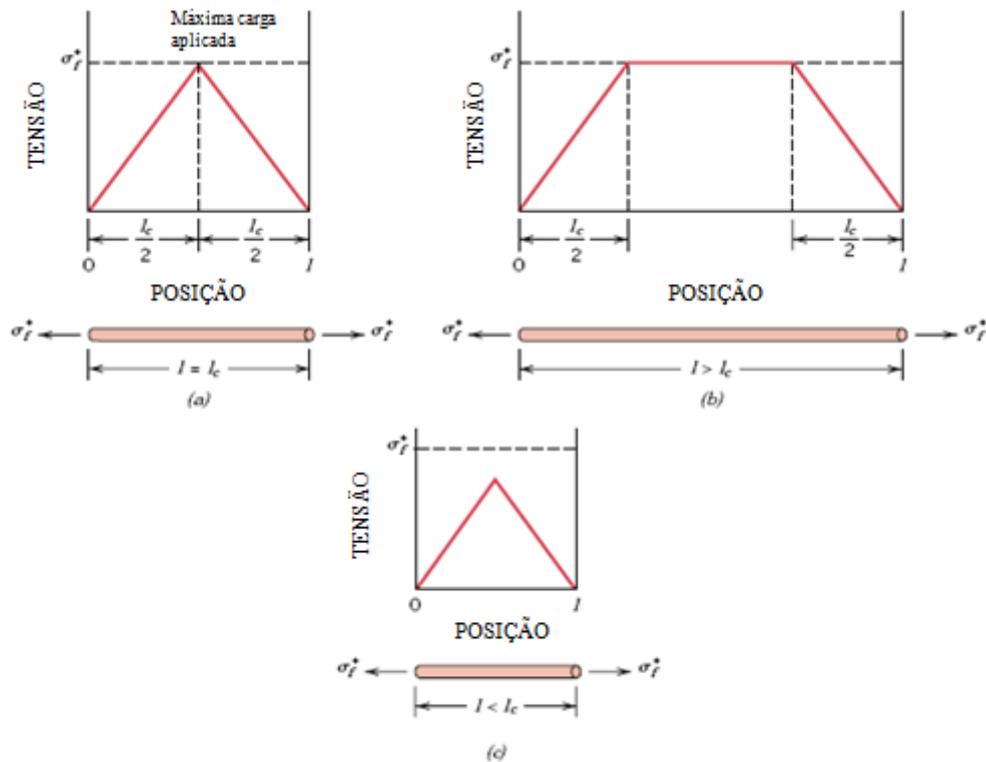


Figura 17: Perfis tensão-posição quando comprimento da fibra l , é (a) igual ao comprimento crítico, l_c , (b) maior que o comprimento crítico e (c) menor que o comprimento crítico para um compósito reforçado com fibras.

Quando uma tensão igual à σ_f^* , é aplicada a uma fibra que possui exatamente o comprimento crítico, tem-se como resultado o perfil tensão-posição que está mostrado na figura 17(a); isto é, a carga máxima na fibra é atingida somente no eixo central da própria fibra. À medida que o comprimento da fibra, l , aumenta, o esforço causado pela fibra se torna

mais efetivo; isso está demonstrando na figura 17 (b), que representa um perfil da tensão em função da posição axial para $l > l_c$ quando a tensão aplicada é igual à resistência da fibra. A figura 17 (c) mostra o perfil tensão-posição para $l < l_c$.

As fibras para as quais $l > l_c$ (normalmente $l > 15l_c$) são chamadas contínuas; as fibras descontínuas ou curtas possuem comprimentos menores que este. No caso de fibras descontínuas com comprimentos significativamente menores que l_c , a matriz se deforma ao redor da fibra de modo tal que virtualmente não existe qualquer transferência de tensão, havendo apenas um pequeno reforço devido à fibra. Estes são, essencialmente, os compósitos particulados. Para que se desenvolva uma melhoria significativa na resistência do compósito, as fibras devem ser contínuas (CALLISTER,2002).

Conforme descrito na equação (4) sobre a teoria de reforço de compósitos poliméricos, resumimos na figura xx abaixo, de forma clara, a influência dos principais parâmetros materiais que influenciam em maior ou menor grau na eficiência de reforço de termoplásticos com fibras curtas, onde a resistência mecânica do compósito está relacionada com o comprimento da fibra de reforço e a outros fatores, tais como a orientação e concentração da fibra e a adesão interfacial polímero-reforço.

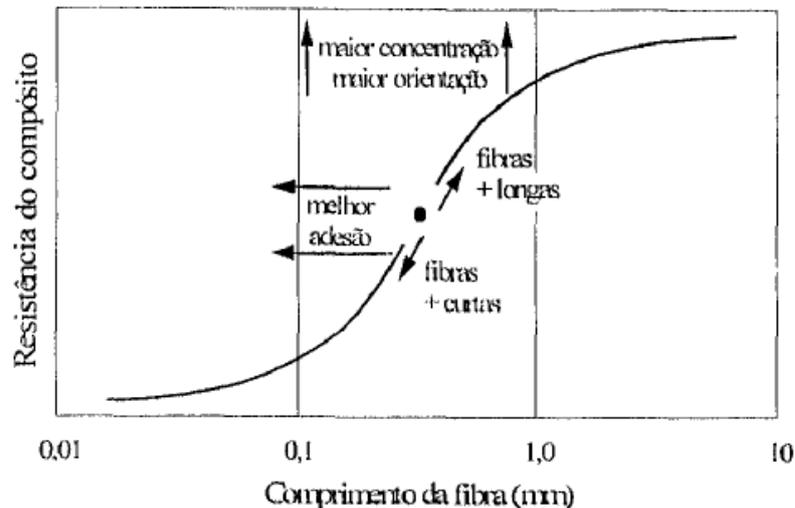


Figura 18: Principais fatores que afetam a resistência de termoplásticos reforçados

Podemos verificar neste gráfico que a resistência do compósito desloca ao longo da curva (o ponto de referência na curva em “S”) para valores maiores ou menores em função do comprimento da fibra, enquanto aumento na concentração e grau de orientação da fibra desloca a curva verticalmente para cima. A curva em “S” é também deslocada

horizontalmente à esquerda para comprimentos menores da fibra com aumento da adesão interfacial fibra-polímero, conforme as equações (3) e (4) explicadas acima.

As fibras de vidro longas ($l > 5-10$ mm) apresentam resistência superior às fibras curtas ($l = 0.2-1.0$ mm), pelo fato das primeiras se aproximarem do comportamento de fibras contínuas. Esta afirmação fica clara na figura xx acima e é atestada por dados da Tabela xx abaixo sobre a resistência à flexão para diversos termoplásticos reforçados com fibras de vidro e carbono (curtas e longas contínuas).

Tabela 03: Efeito do reforço de fibra longas e curtas na resistência à flexão (MAXWELL, 1983)

RESISTÊNCIA À FLEXÃO (MPa)				
Polímero	Fibra	Não-Carregada	30% fibra curta	65% fibra longa
PP	vidro	33	86	350
PET	vidro	60	140	800
PA 66	vidro	85	180	650
PES	vidro	90	145	500
PEEK	vidro	91	150	780
PEEK	carbono	91	215	1100

Após a análise dos conceitos sobre reforço de termoplásticos com fibras podemos enumerar as principais variáveis materiais do compósito que irão afetar significativamente as propriedades mecânicas de termoplásticos reforçados: tipo de fibra e sua concentração, comprimento médio das fibras, orientação da fibra e anisotropia, interface fibra-polímero e a dispersão das fibras.

2.7 ESPELHOS RETROVISORES EXTERNOS DE VEICULOS AUTOMOTORES

Espelhos retrovisores externos de veículos automotores com corpo termoplástico, um item universal agora, foi uma inovação francesa, introduzida no Renault 14 em 1976 (Maxwell, 1994).

Um espelho retrovisor externo de um veículo automotor compreende pelo menos um espelho circundado por pelo menos uma carcaça de espelho sustentada por uma

armação ligada articuladamente a um elemento de base adaptado para sua fixação no veículo, o espelho podendo ser visto pelo ocupante do veículo para que lhe seja proporcionada uma imagem diretamente refletida nele e que constitui um campo de visão direto, o elemento de base compreendendo uma primeira parte de cobertura ligada a ele e uma segunda parte de cobertura que pode ser ligada à primeira parte de cobertura, constituindo em conjunto uma carcaça (SACCAGNO,2005).

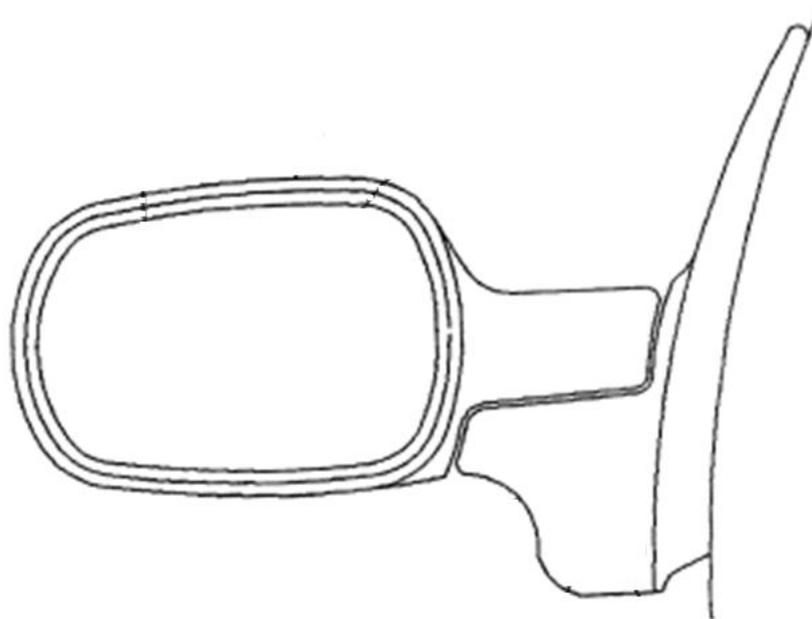


Figura 19: Espelho retrovisor externo de um veículo

A grande maioria dos espelhos retrovisores externos, utilizam peças moldadas em termoplásticos, com uma grande variedade de formulações baseadas nas poliamidas 6 e 6.6. Outros materiais também são utilizados na composição dos espelhos retrovisores, mas com função estética e não sofrem solicitações mecânicas. A aditivação nos materiais (i.e. aditivos para resistência aos raios ultra violeta) são normalmente utilizadas, para as peças sem acabamento de pintura.

Poliamidas reforçadas com fibras de vidro são utilizadas devido aos requisitos de desempenho mecânico dos espelhos retrovisores externos, especialmente a resistência a fluência necessária para resistir às solicitações dos mecanismos dos espelhos retrovisores.

A seleção dos materiais deve ser precisa e devido às características estruturais de algumas peças o uso de ligas metálicas ainda é bastante difundido (Maxwell, 1994).

O espelho retrovisor externo de um veículo automotor é um item crítico para a segurança ao dirigir e um fator de qualidade com relação ao seu desempenho de vibração.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 MATERIAIS

Utilizou-se neste trabalho o comparativo de três materiais: liga de zinco número 5 (ZnAl4Cu1Mg), liga de alumínio A380.0 (Al-Si8Cu3Fe) e um compósito (Poliamida 6 com 30 por cento de reforço de fibra de vidro).

Estes materiais foram escolhidos devido à grande utilização no mercado automobilístico.

3.1.1 Liga de alumínio

A designação da liga (A380.0), os limites da composição química, as propriedades mecânicas e as propriedades físicas foram obtidas da literatura com referências da Associação do Alumínio (AA “*Aluminum Association*”) (ASM, 1992) e da norma ISO 3522. Estas referências são utilizadas na norma GMW5, que é vastamente empregada na indústria automobilística para especificar o material a ser utilizado nas peças e componentes dos veículos automotores. Esta norma é utilizada como referência para caracterizar as propriedades dos materiais utilizados em aplicações na indústria automobilística.

Os limites da composição química da liga de alumínio A380.0 (Al-Si8Cu3Fe), são mostrados no quadro 04 abaixo.

Elemento	Unidade	ISO3522	AA
Silício	% massa	7.5...9.5	7.5...9.5
Ferro	% massa	1.3 max	1.3 max
Cobre	% massa	2.5...4.0	3.0...4.0
Manganês	% massa	0.6 max	0.50 max
Magnésio	% massa	0.3 max	0.10 max
Cromo	% massa	—	—
Níquel	% massa	0.5 max	0.50 max
Zinco	% massa	1.2 max ^(Nota 1)	3.0 max
Chumbo	% massa	0.3 max	—
Estanho	% massa	0.2 max	0.35 max
Berílio	% massa	—	—
Titânio	% massa	0.2 max	—
Outros ^(Nota 2) cada	% massa	—	—
total	% massa	0.5 max	0.50 max

Nota 1: Nível de zinco acima de 3.0 % é permitido para a liga A380.0 pela AA

Nota 2: Resíduos seguem especificação da AA (Aluminium Association)

Quadro 04: Limites da composição química em % de massa (Restante da liga é alumínio)

As propriedades mecânicas e físicas da liga de alumínio A380.0 (AlSi8Cu3Fe) obtidas da especificação GMW5 e da literatura (ASM, 1992) apresentam os valores nas tabelas 04 e 05 respectivamente. Estes valores serão utilizados como referência nos estudos que serão mostrados nos capítulos posteriores.

Tabela 04: Propriedades mecânicas da liga de alumínio

Propriedades Mecânicas	unidades	valores
Resistência a tração	MPa	330
Tensão de tração no escoamento	MPa	165
Módulo de elasticidade	GPa	71

Tabela 05: Propriedades físicas da liga de alumínio

Propriedades Físicas	unidades	valores
Densidade	g/cm ³	2.7
Intervalo de fusão	°C	520 a 590

Os valores da temperatura de injeção da liga de alumínio A380.0 obtidos na literatura são de 635 a 704 °C (ASM, 1992), para a injeção das peças. Estes valores

comparados a outros materiais são altos, liga de zinco e compósitos, e a vida útil da ferramenta, por este motivo, é menor.

3.1.2 Liga de zinco

A especificação de material utilizada como referência para o estudo é a GMW3341, aplicada para as ligas de zinco para injeção a alta pressão de peças com aplicação na indústria automobilística e outras indústrias aliadas. As ligas de zinco para injeção são especificadas pela sua composição química.

Os limites da composição química, as propriedades mecânicas e as propriedades físicas foram obtidas da literatura com referência a norma ASTM B86 referente a liga de zinco número 5 ou AC41A (ASM, 1992). Esta referência é utilizada na especificação de material utilizada na indústria automobilística, e é empregada para especificar o material a ser utilizado nas peças e componentes dos veículos automotores. Esta norma é utilizada como referência para caracterizar as propriedades dos materiais utilizados em aplicações na indústria automobilística.

Os limites da composição química da liga de zinco número 5 (ZnAl4Cu1Mg), são mostrados no quadro 05 abaixo.

Elemento	Unidade	ASTM B86
Alumínio	% massa	3.5...4.3
Cobre	% massa	0.75...1.25
Magnésio	% massa	0.030...0.080
Ferro	% massa	0.1 max
Chumbo	% massa	0.005 max
Cádmio	% massa	0.004 max
Estanho	% massa	0.003 max

Quadro 05: Limites da composição química em % de massa da liga de zinco número 5

As propriedades mecânicas da liga de zinco número 5 (ZnAl4Cu1Mg), são mostrados na tabela 06 abaixo.

Tabela 06: Propriedades mecânicas da liga de zinco número 5

Propriedades Mecânicas	unidades	valores
Resistência a tração	MPa	328
Tensão de tração no escoamento	MPa	240
Módulo de elasticidade	GPa	85.5

As propriedades físicas da liga de zinco número 5 (ZnAl4Cu1Mg), são mostrados na tabela 07 abaixo.

Tabela 07: Propriedades físicas da liga de zinco número 5

Propriedades Físicas	unidades	valores
Densidade	g/cm ³	6.7
Intervalo de fusão	°C	380 a 386

Os valores da temperatura de injeção da liga de zinco número 5 obtidos na literatura são de 395 a 425 °C (ASM, 1992), para a injeção das peças.

3.1.3 Poliamida 6 reforçada com fibra de vidro

A especificação utilizada como referência para o presente estudo é a norma GMW3029, aplicada para poliamidas 6 reforçadas com fibra de vidro, que são utilizadas em componentes moldados por injeção ou extrusão. Esta norma é utilizada como referência para caracterizar as propriedades dos materiais utilizados em aplicações na indústria automobilística.

As propriedades mecânicas da poliamida 6 reforçada com 30 por cento de fibra de vidro, são mostradas na tabela 08 abaixo.

Tabela 08: Propriedades mecânicas da poliamida 6 com 30% de fibra de vidro

Propriedades Mecânicas	unidades	valores
Tensão de tração na ruptura	MPa	185
Módulo de flexão	MPa	7250 a 10250

As propriedades físicas da poliamida 6 reforçada com 30 por cento de fibra de vidro, são mostradas na tabela 09 abaixo.

Tabela 09: Propriedades físicas da poliamida 6 com 30% de fibra de vidro

Propriedades Físicas	unidades	valores
Densidade	g/cm ³	1.36
Teor de carga	%	27 a 33
Temperatura de fusão	°C	211 a 225

Os valores da temperatura de injeção da poliamida 6 com 30% de reforço de fibra de vidro obtidos na literatura fornecida pela Lanxess é de 280 °C, para a injeção das peças.

No presente trabalho foi utilizado a resina de poliamida 6 reforçada com 30 % de fibra de vidro, comercializada com o nome comercial Durethan BKV30GH2.0900051.

Os testes foram realizados em corpos de prova injetados com a resina Durethan BKV30GH2.0900051, lote de fabricação: 30CD8A2670, datada de 05 de dezembro de 2008, gentilmente fornecida pela LANXESS.

3.2 MÉTODOS

3.2.1 Análise virtual e testes físicos

A análise do comportamento de uma peça ou componente em um veículo automotor utilizando engenharia auxiliada por computador ou CAE (*Computer Aided Engineering*) é uma ferramenta muito útil na engenharia e esta cada vez mais difundida no desenvolvimento de novos produtos, assim como nos produtos correntes, pois esta ferramenta analisa e processa cálculo de forma a simular uma determinada situação baseada na informação disponibilizada pelo engenheiro, se preocupando menos com a parte operacional e mais com a questão estratégica, fazendo do CAE uma ferramenta poderosa para redução de custos de um projeto e minimizando o tempo para o lançamento de um produto.

“CAE é a análise e avaliação do projeto da engenharia usando técnicas computacionais para calcular a operacionalização e funcionalidade do produto e parâmetros da manufatura muito complexos para métodos clássicos”. (REHG, 1994)

O CAE pode ser utilizado no processo de projeto, análise e níveis de avaliação do produto, ele verifica o produto referente a sua funcionalidade, encaixes e design, podendo reavaliá-las, checa se as necessidades são compatíveis com a capacidade de produção; e reduz drasticamente o tempo gasto com cálculos operacionais e protótipos.

O CAE consegue se adaptar as mais diferentes áreas devido a sua grande flexibilidade, podendo ser utilizado em áreas que variam de construção civil à indústria automobilística.

Em áreas como a indústria automobilística, ferramentas como o CAE podem determinar o custo de um projeto, verificar falhas no projeto, pré-visualização do produto, apontar falhas no design ou na funcionalidade do produto e simular comportamentos.

Com esta ferramenta foi possível simular o comportamento de vários materiais aplicados no suporte do espelho retrovisor externo de um veículo automotor, objeto de estudo, simulando o comportamento da vibração do conjunto, na primeira e na segunda frequência natural de vibração, chegando aos resultados e conclusões que serão apresentados nos capítulos posteriores.

Com o objetivo de estudar o comportamento e a resposta do conjunto espelho retrovisor externo além de enriquecer o presente estudo, outros compósitos poliméricos foram utilizados na simulação da característica de vibração (SONG,2005).

Testes físicos também foram realizados nos conjuntos de espelhos retrovisores externos montados em veículos com a base do espelho retrovisor com os diferentes materiais para podermos comparar com os resultados prévios de análise virtual. Os testes físicos foram realizados conforme procedimentos utilizados na indústria automobilística.

3.2.2 Teste de bancada na base do espelho retrovisor externo

Baseado no resultado da análise virtual para os espelhos retrovisores externos de veículos automotores a vibração do espelho é crítica no eixo Z, baseado neste critério elaborou-se um dispositivo que simula a fixação do suporte do espelho retrovisor externo no veículo, aplicou-se um esforço no eixo Z nas peças para cada um dos três materiais estudados

(liga de zinco, liga de alumínio e compósito) para análise do modo de ruptura de cada material. Este ensaio permitirá julgar quais materiais apresentaram uma melhor resposta a solicitação e poderemos verificar as faces da fratura na região do esforço solicitado.

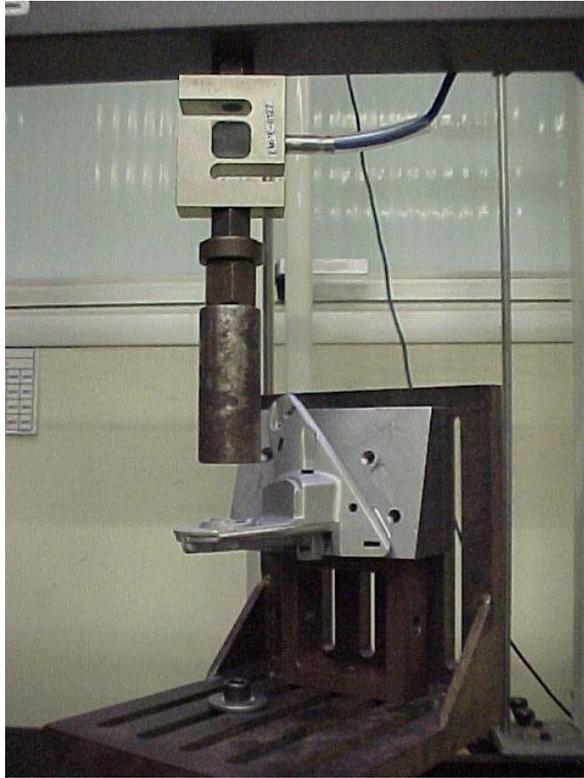


Imagem 01: Máquina universal de ensaio e dispositivo de teste

O ensaio foi realizado em uma máquina universal de ensaios da marca KRATOS modelo KE2000MP com célula de carga de 2000 kgf.

3.2.3 Caracterização dos materiais

3.2.3.1 Análise química

A técnica utilizada para a análise química das amostras das bases metálicas dos espelhos retrovisores foi a de espectrometria de emissão atômica com plasma de argônio

acoplado e para a análise química do silício na liga de alumínio foi efetuada a análise através de via úmida.

Foram escolhidas aleatoriamente as regiões das peças para retirada das amostras, sendo no final reportada a faixa dos valores encontrados.

Na técnica utilizada de espectrometria de emissão atômica com plasma de argônio acoplado, a amostra é vaporizada e o elemento de interesse atomizado a uma temperatura extrema (7000°C) no plasma de Argônio, gerado e mantido por uma fonte de rádio frequência.



Imagem 02: Equipamento ICP AES modelo VISTA AX

A espectrometria de emissão atômica com plasma de argônio acoplado é utilizado para a determinação dos níveis de PPM de metais em amostras líquidas. Não é apropriado para gases nobres, halogênios ou elementos leves como hidrogênio (H), carbono (C), nitrogênio (N) e oxigênio (O).

Amostras sólidas requerem procedimento de dissolução antes da análise. O volume final da solução deve ser de pelo menos 25 ml. O solvente a ser utilizado pode ser água, normalmente contendo 10% de ácido, ou um solvente orgânico como o Xileno. Este equipamento oferece um excelente limite de detecção e um vasto alcance para a maioria dos elementos, além da rapidez na análise (CHEREMISINOFF,1996).

3.2.3.2 Espectroscopia vibracional de absorção no infravermelho

Uma das técnicas utilizadas para a caracterização de polímeros é a espectroscopia vibracional de absorção no infravermelho (FTIR).

A espectroscopia é o estudo da interação da radiação eletromagnética com a matéria. A radiação eletromagnética é composta de um vetor campo elétrico e um vetor campo magnético, mutuamente ortogonal, que se propagam em uma dada direção. A radiação eletromagnética apresenta a dualidade onda-partícula. A natureza ondulatória manifesta-se por meio do efeito Compton e do efeito fotoelétrico.

A radiação eletromagnética interage com a matéria em três processos distintos: absorção, emissão e espalhamento de radiação.

A espectroscopia vibracional estuda a transição das vibrações normais moleculares e compreende duas técnicas: absorção no infravermelho e espalhamento Raman.

A maior parte dos estudos em infravermelho (IR) referem-se à região média (MIR), onde se localizam as frequências vibracionais fundamentais (400 a 4000 cm^{-1}), que correspondem às transições vibracionais entre o nível de energia vibracional fundamental ($v=0$) e o primeiro nível vibracional excitado ($v=1$). A região de 400 a 1800 cm^{-1} é conhecida como a região da impressão digital do espectro IR, pois é nessa região que aparecem a maior parte das frequências vibracionais fundamentais ($\Delta v=1$).

Os aparelhos usados para se obter o espectro IR, são de dois tipos: espectrofotômetro dispersivo e espectrômetro por transformada de Fourier (FTIR).



Imagem 03: Aparelho FTIR modelo 16PC da marca Perkin Elmer

O espectrofotômetro dispersivo usa monocromador com rede de difração (ou prisma de NaCl, KBr ou CsI) para decompor a radiação no infravermelho. É um tipo de aparelho já em desuso, por ser lento, caro e depender de mecânica de alta precisão para a varredura do espectro.

O espectrômetro FTIR utiliza o interferômetro de Michelson, como princípio de funcionamento, sendo mais rápido, preciso, reprodutível e mais acessível. O espectrômetro FTIR é constituído por uma fonte de radiação, um interferômetro, compartimento de amostra e um detector de radiação infravermelho. Os elementos de um espectrômetro FTIR variam de acordo com as regiões do infravermelho em estudo. Os aparelhos comerciais de rotina operam, normalmente, em uma única região (MIR), e seus elementos são apropriados e fixos, mas alguns espectrômetros aplicados à pesquisa são versáteis, possibilitando a substituição dos elementos de acordo com a região de interesse. Há espectrômetros que podem operar nas três regiões do infravermelho (FIR, MIR e NIR) (CANEVAROLO JUNIOR, 2003).

Para a caracterização das bases do espelho retrovisor em compósitos, utilizou-se a técnica de espectroscopia vibracional no infravermelho médio em comparação com padrão de poliamida 6.

O equipamento utilizado foi o aparelho FTIR modelo 16PC da marca Perkin Elmer.

3.2.3.3 Ensaios mecânicos

Os ensaios de tração, flexão e compressão são executados em um aparelho chamado de “Máquina Universal de Ensaios”. A Máquina Universal de Ensaios consiste basicamente de um arranjo constituído por duas travessas (uma delas fixa e outra móvel), uma célula de carga, um mecanismo de direcionamento, acessórios de afiação dos corpos de prova e extensômetros.

Na travessa móvel, estão acoplados um mecanismo de direcionamento e uma célula de carga. O mecanismo de direcionamento controla o sentido (para cima ou para baixo) e a velocidade da travessa móvel, que deve ser constante e é pré-determinada para o ensaio. A máquina de ensaios deve ter a capacidade de manter velocidades constantes em um intervalo de 1 a 500 milímetros/segundo, com tolerância de erro pequena (geralmente menor que 20%).

A célula de carga registra a carga (geralmente em Newtons) durante o ensaio, esta deve ter uma precisão maior que 99% do valor real da carga. As células de carga (normalmente com capacidade para 0,5 kN, 5 kN e 50 kN) devem ser escolhidas de modo a se obter uma boa sensibilidade nos ensaios. Isto é feito tomando-se os valores de fundo de escala

(capacidade da célula de carga), seu erro percentual e os valores estimados da carga necessária máxima para ensaio do material.

Nos ensaios de tração, são acoplados às travessas fixas e móveis, dispositivos de afixação dos corpos de prova (garras). Estas garras podem apresentar acionamento manual ou pneumático.

Nos ensaios de flexão, utilizam-se apoios que podem ser de dois pontos ou três pontos. Um dos apoios é acoplado à travessa móvel, enquanto os demais são acoplados em uma base, que é adaptada à travessa fixa.

Nos ensaios de compressão são utilizadas duas bases, que são afixadas na travessa móvel e na fixa.

Os extensômetros têm o papel de medir a deformação do polímero durante o ensaio, no caso de deformação que exijam precisão elevada. Esta deformação pode também ser registrada simplesmente pelo deslocamento da travessa móvel em relação à travessa fixa, em testes que exijam precisão menor.

As máquinas mais sofisticadas da atualidade são acopladas a um micro-computador provido de um software para programação, aquisição e tratamento dos dados (CANEVAROLO JUNIOR, 2003).



Imagem 04: Máquina universal de ensaios QTEST

O método mais comum de ensaios de flexão é o que utiliza o carregamento em um sistema com três pontos. Nos ensaios de flexão em três pontos, o corpo de prova, uma barra de seção cruzada retangular, é ajustado em dois apoios fixados a um suporte (travessa fixa), e o carregamento é realizado por meio de um terceiro apoio (travessa móvel), posicionado a uma distância média entre os apoios fixados aos suportes. Os apoios devem possuir superfícies cilíndricas, de modo a evitar endentações ou falhas devido à concentração de tensões nos corpos de provas.

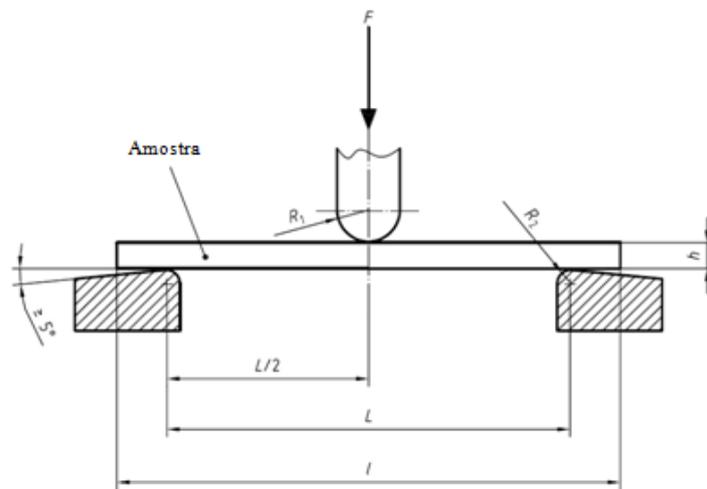


Figura 19: Exemplo de ensaio de flexão em três pontos

A separação dos apoios (a sua distância) deve ser ajustada de modo que sua razão com a profundidade do corpo de prova (L/h) seja igual a 16 ± 1 , a menos que uma distância maior tenha de ser utilizada em razão de certos critérios.

Neste tipo de ensaio, o cálculo da deflexão na qual a máxima deformação permitida (5%) irá ocorrer pode ser calculada através da seguinte equação:

$$D = rL^2 / 6d \quad (06)$$

Na equação (06), os parâmetros são: D é a deflexão no ponto médio entre os apoios, r é a deformação, L é a distância entre os apoios e d é a profundidade do corpo de prova.

Estes ensaios são, geralmente, aplicados a materiais poliméricos rígidos e semi-rígidos. O corpo de prova é defletido até que sua ruptura ocorra na superfície oposta ao

carregamento, ou até que uma deformação máxima de 5,0% seja alcançada. Entretanto, a resistência à flexão não pode ser determinada para aqueles materiais que não rompem ou não falham na superfície oposta ao carregamento dentro de um limite máximo de 5,0% de deformação (CANEVAROLO JUNIOR, 2003).

Os ensaios de flexão foram realizados seguindo a norma ISO178, e foram realizados sobre uma tensão de flexão de três pontos. Foi utilizado para a realização dos testes de flexão uma máquina universal de ensaios da marca MTS e modelo QTEST, imagem 04, a capacidade do equipamento é de 100 kN na compressão, tração e flexão.

3.2.3.4 Análise metalográfica

As amostras para análise metalográfica foram retiradas da extremidade das peças e preparadas pelo método convencional utilizando as lixas de número 220 até a lixa de número 600, seguido de polimento em óxido de magnésio. Estas etapas foram executadas em um equipamento Struers para lixamento e polimento.



Imagem 05: Lixadeira e politriz Struers, modelo rotapol/rotoforce 4



Imagem 06: Microscópio ótico Carl Zeiss, modelo Axiophot

O ataque nas amostras foi feito com ácido fluorídrico (HF) e as análises metalográficas foram realizadas em microscópio ótico Carl Zeiss, modelo Axiophot.

3.2.3.5 Análise fractográfica

Foram realizadas análises fractográficas na superfície de fratura após submissão das bases do espelho retrovisor externo aos ensaios destrutivos em bancada.

O microscópio eletrônico de varredura é, sem dúvida, o microscópio eletrônico mais versátil, devido às suas várias características. É geralmente utilizado para o estudo de estruturas superficiais ou subsuperficiais de amostras com dimensões relativamente grandes.

As imagens têm alta profundidade de foco, o que significa obter diferentes relevos da superfície da amostra simultaneamente em foco. São imagens tridimensionais e, portanto, mais fáceis de interpretar que as imagens de projeção de microscopia de transmissão. O microscópio eletrônico de varredura (SEM) também produz imagens de alta resolução, o que garante obter alta ampliação de detalhes próximos sem perda de nitidez. A preparação de amostras e a obtenção de imagens são relativamente simples. A combinação destas características justifica o fato do microscópio eletrônico de varredura ser hoje um dos equipamentos mais utilizados na pesquisa de materiais.

O aspecto mais atrativo da microscopia de varredura é a facilidade de preparação de amostra. Materiais não condutores, como a maioria dos polímeros, requerem em geral apenas revestimentos condutivos ou o uso de baixa voltagem de aceleração do feixe.

Como a topografia da superfície é geralmente a principal característica de interesse na análise, a espessura da amostra não é um aspecto crítico, como acontece em microscopia eletrônica de transmissão. A montagem da amostra é feita sobre suportes metálicos, utilizando adesivos condutivos, tais como fitas de carbono ou suspensões coloidais de prata ou carbono. O revestimento da amostra por um filme condutor tem como objetivo evitar o acúmulo de carga negativa, no caso da mesma ser formada por um material não condutor. A camada de metal deve ser suficientemente contínua e fina (menor que 20 nm) para não mascarar a topografia da superfície, porém deve ser adequada para conduzir o excesso de carga negativa. A evaporação de metal e a metalização por partículas são as técnicas mais comuns para esta finalidade. Os metais mais utilizados são ouro, liga ouro-paládio, platina, alumínio e carbono (CANEVAROLO JUNIOR, 2003).



Imagem 07: Microscópio eletrônico de varredura

As amostras dos compósitos foram metalizadas com uma camada de ouro para obtenção das imagens.

Foram realizadas análises fractográficas das peças submetidas ao teste de bancada após serem submetidas ao esforço no sentido do eixo Z até a ruptura.

O equipamento utilizado foi o microscópio eletrônico de varredura Carl Zeiss modelo DSM 940A .



Imagem 08: Microscópio eletrônico de varredura de bancada Hitachi TM1000

Utilizou-se o microscópio eletrônico de varredura de bancada da marca HITACHI modelo TM 1000.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 ANÁLISE VIRTUAL

A tabela 11 mostra os resultados dos testes virtuais referente ao espelho retrovisor externo de um veículo automotor. Análise realizada para comparar a frequência natural de vibração na primeira frequência natural, referente ao eixo Z e na segunda frequência natural, referente ao eixo X.

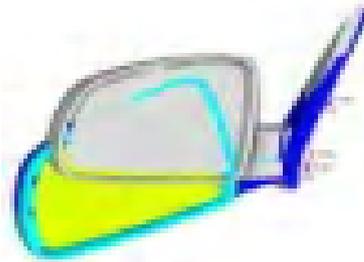


Figura 20: 1ª frequência natural, eixo Z



Figura 21: 2ª frequência natural, eixo X

Os testes virtuais foram realizados simulando a fixação do conjunto espelho retrovisor na porta de um veículo automotor e verificando a resposta a vibração do conjunto.

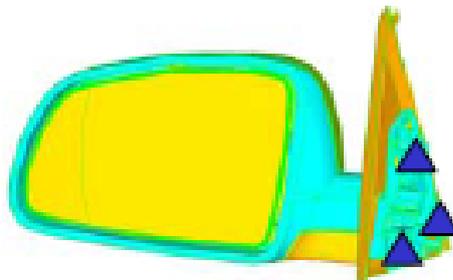


Figura 22: Pontos de fixação do espelho retrovisor na configuração base metal e capa em polímero

A proposta de estudo consiste em substituir duas peças, a base do espelho retrovisor externo feita de liga de zinco número 5 e a capa da base feita em polímero (ASA: Acrilonitrila-Estireno-Acrilato) por uma única peça feita de poliamida 6 com 30 por cento de reforço de fibra de vidro curta.

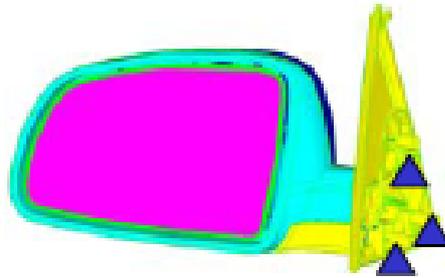


Figura 23: Pontos de fixação do espelho retrovisor na configuração base em compósito

Outra análise proposta é a troca do material da base do espelho feita em liga de zinco número 5 por uma liga de alumínio A380.0.

As informações necessárias para efetuar a análise virtual encontram-se na tabela 10, e os resultados da análise virtual encontram-se na tabela 11, o desvio nos valores dos resultados, aplicado 8% na média, é necessário para garantir a diferença dos resultados entre o teste virtual e o teste físico.

Os resultados da análise virtual simulando os esforços e as tensões submetidas à peça no sentido da vibração no eixo Z (1ª frequência natural) para a base do espelho retrovisor pode ser observado na figura 24 onde as regiões com cores mais claras (verde, amarela e rosa) são as mais solicitadas na base do espelho retrovisor.

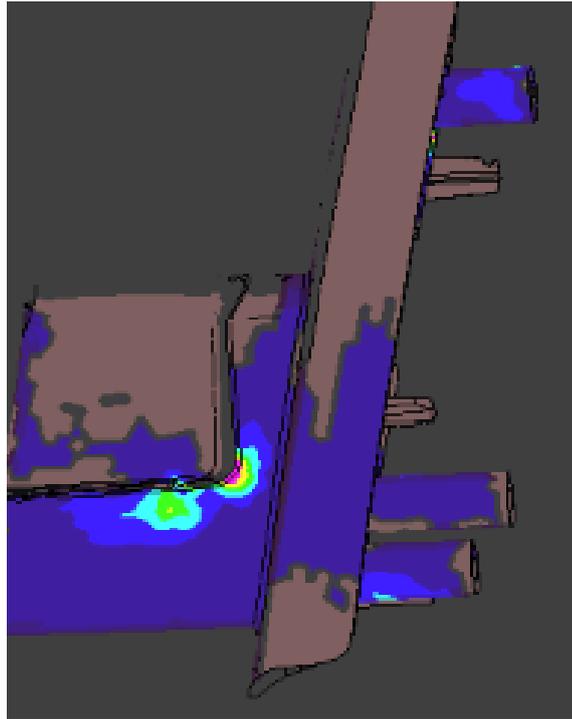


Figura 24: Regiões com tensão após esforço no eixo Z

Tabela 10: Características dos materiais utilizadas na análise virtual

Material	Densidade	Módulo
Liga de zinco número 5	6.7 g/cm ³	85500 MPa
Poliamida 6 com 30% fibra de vidro	1.36 g/cm ³	7250 MPa

Tabela 11: Resultados da análise virtual

Base do espelho retrovisor	1ª frequência natural (Hz)	2ª frequência natural (Hz)
Liga de Zinco número 5	53 ± 4	84 ± 7
Poliamida 6 com 30% FV	45 ± 3.5	50 ± 4

Análises virtuais e estudos com vários materiais poliméricos para análise da influência da propriedade dos materiais nas características de vibração de espelhos retrovisores já foram estudados (SONG, 2005), porém com enfoque nos materiais poliméricos e não comparando os resultados com o outros materiais metálicos, baseado neste estudo e na necessidade de esclarecer o comportamento do conjunto espelho retrovisor com outros materiais com módulo maior que a poliamida 6 com 30% de reforço de fibra de vidro, realizou-se a mesma análise para diferentes materiais compósitos poliméricos.

Os valores encontrados na simulação da base do espelho retrovisor em uma única peça incorporando a capa, encontram-se na tabela 12 onde pode-se observar através do

gráfico 01 o comportamento de todos os materiais nas duas configurações, base em metal e capa em polímero (2 peças) e base incorporando a capa em compósito (1 peça).

Tabela 12: Valores da simulação da base utilizando uma única peça

Base do espelho retrovisor	1ª frequência natural (Hz)	2ª frequência natural (Hz)
Poliamida aromática 66 com 35% de fibra de vidro e 22% de carga mineral	58 ± 4.6	64 ± 5.1
Poliarilamida com 50% fibra de vidro	63 ± 5	70 ± 5.6
Polibutilenotereftalato com 50% de fibra de vidro	59 ± 4.7	65 ± 5.2

Resultados análise virtual

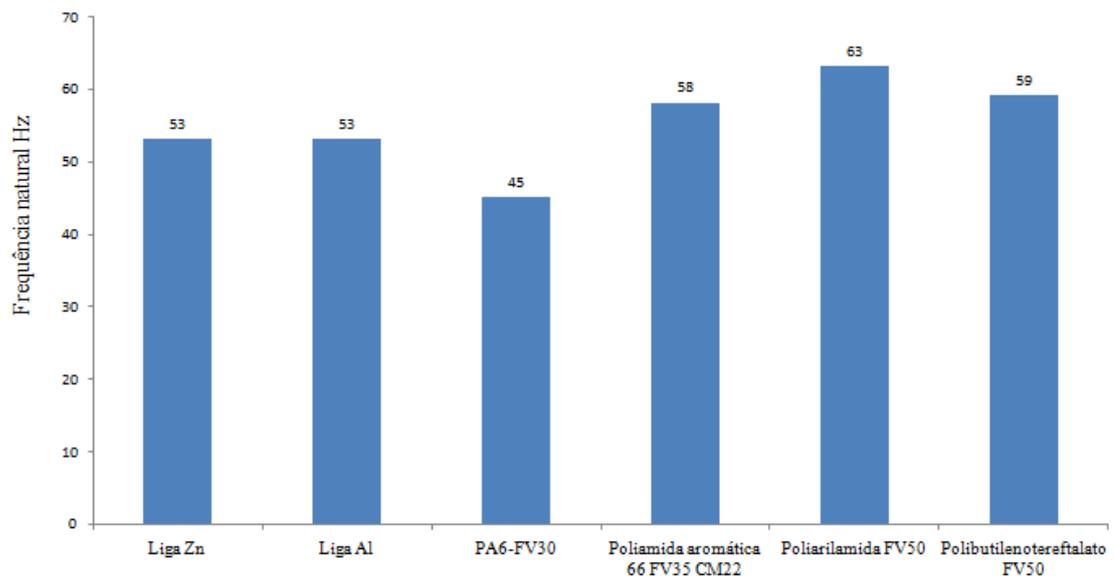


Gráfico 01: Resultados da análise virtual nas duas configurações metal e compósito para a primeira frequência natural (Hz).

Já no gráfico 02 os resultados nos mostram o comportamento da base em compósito, onde podemos observar que os resultados apresentam uma tendência linear ao aumentarmos o módulo dos materiais para a base proposta em uma única peça, incorporando a capa.

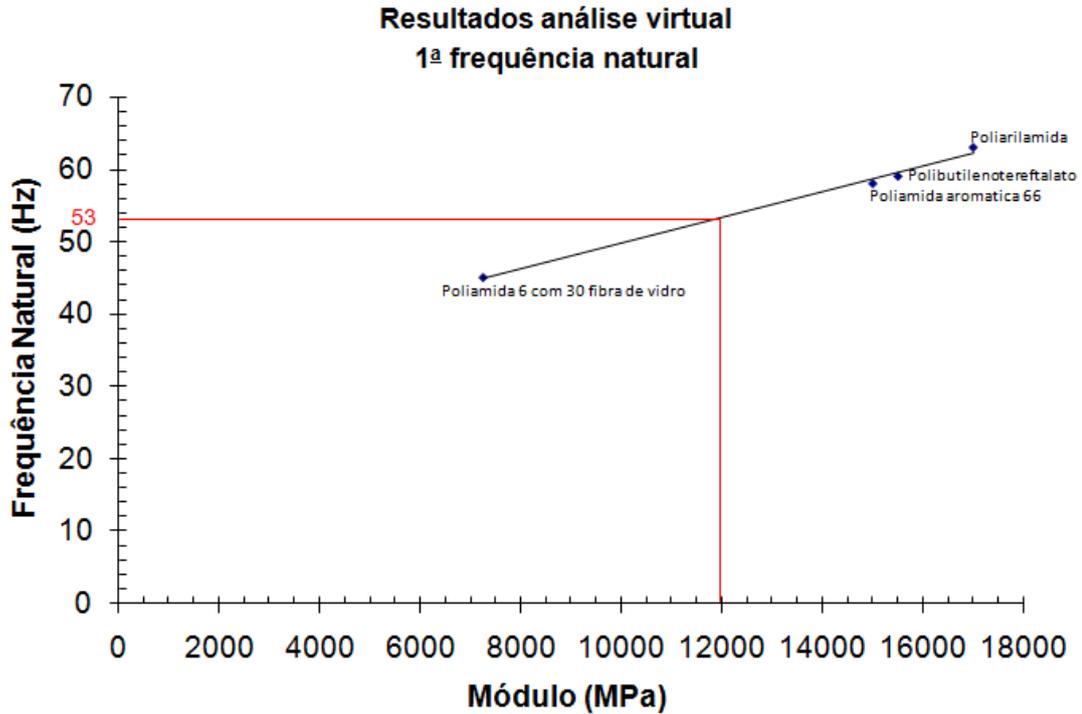


Gráfico 02: Resultados da análise virtual para a base em compósito

Os resultados mostram que para termos o mesmo valor de resposta a vibração da base em metal na 1ª frequência natural, necessitaríamos de um material com módulo acima de 12000 MPa, este material deve atender aos requisitos de exposição externa, caso não tenha acabamento de pintura e custo relativamente similar ao material atualmente utilizado para compensar a alteração no projeto.

Outra solução seria melhorar a estrutura da base com a capa integrada utilizando material compósito para que possamos obter resultados no mesmo nível do espelho retrovisor com a base em metal.

O desempenho do espelho retrovisor externo com relação à vibração, o custo da matéria prima e a densidade dos materiais, objetos deste estudo, são mostrados na tabela 13, onde a razão frequência:custo reflete a ordem de escolha para um desempenho de vibração com o mínimo de custo possível, e onde considerações com o peso não são importantes.

Para ordenar a escolha para um melhor desempenho de vibração com o menor peso e o menor custo utiliza-se a razão frequência:peso custo.

Tabela 13: Análise dos resultados dos materiais da base do espelho retrovisor

Material	Frequência natural (Hz)	Custo (R\$/kg)	densidade (g/cm ³)	Razão	
				Frequência: Custo (Hz.kg/R\$)	Frequência: Peso Custo (Hz.kg.cm ³ /R\$.g)
Liga Zn número 5	53	8.9	6.7	5.96	0.89
Liga Al A380.0	53	6.4	2.7	8.28	3.07
PA6-FV30	45	10.5	1.36	4.29	3.15

Quando somente o custo é levado em consideração, a tabela 13 mostra que a liga de alumínio leva vantagem sobre a liga de zinco e o compósito se torna a pior opção. Quando consideramos o custo e o peso, o compósito leva vantagem sobre as ligas de alumínio e de zinco.

4.2 TESTES FÍSICOS

Testes para verificar o comportamento dinâmico das peças e comparar com os resultados das análises virtuais foram realizados em duas configurações: amostras com material da base do espelho retrovisor utilizando liga de zinco número 5 com capa da base do espelho retrovisor utilizando polímero (ASA: Acrilonitrila-Estireno-Acrilato) e amostras com uma única peça integrada base e capa em compósito, poliamida 6 com 30 por cento de reforço de fibra de vidro.

Os resultados encontrados nos testes físicos são apresentados na tabela 14, somente a 1ª frequência natural foi analisada nos testes físicos para a comparação com os resultados de análise virtual, por ser mais crítica para o motorista.

Tabela 14: Testes físicos nos espelhos retrovisores externos de veículos automotores

Base do espelho retrovisor	1ª frequência natural (Hz)
Liga de Zinco número 5	50.78
Poliamida 6 com 30% FV	43.94

Estes valores encontrados nos testes físicos em veículos automotores dá segurança nos resultados apresentados nas análises virtuais, pois os valores estão dentro dos limites estabelecidos para os resultados mencionados previamente no presente trabalho.

4.3 TESTES DE BANCADA

Testes de bancada simulando as solicitações de campo de maneira exacerbada foram realizados nas peças para análises de seu modo de ruptura.

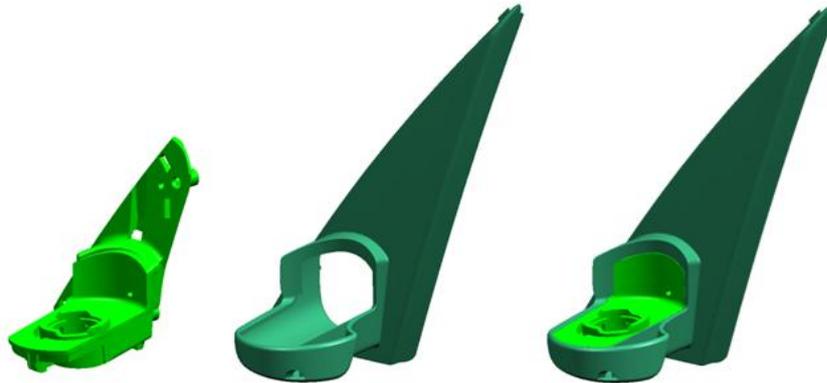


Figura 25: Base do espelho retrovisor e capa do espelho

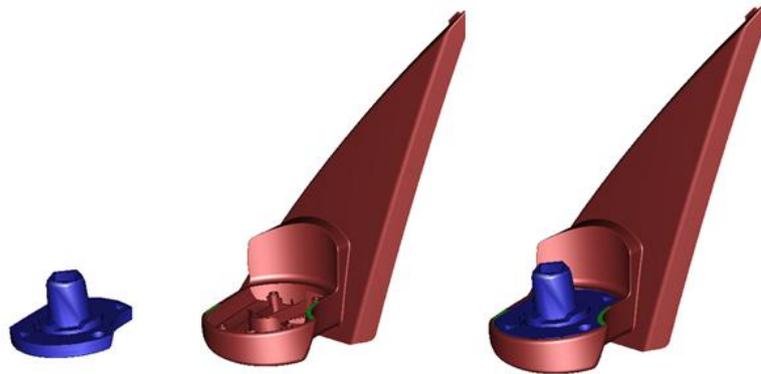


Figura 26: Base do espelho retrovisor utilizando capa integrada

Os espelhos retrovisores externos e as peças, objeto do estudo, foram pesados e as tabelas 15 e 16 apresentam os valores.

Tabela 15: Peso dos conjuntos espelho retrovisor externo

Conjunto espelho retrovisor externo	Peso (g)
Base liga de Zn	1062.48
Base liga de Al	879.19
Base compósito	849.75

Tabela 16: Peso das peças do conjunto espelho retrovisor externo

Peças	Peso (g)
Base liga de Zn	314.63
Base liga de Al	142.64
Base compósito	153.56
capa	72.2
pivô	52.34
Base liga de Zn + capa	386.83
Base liga de Al + capa	214.84
Base compósito + pivô	205.9

A diferença de peso entre os conjuntos pode gerar uma redução de aproximadamente 366,6 g por veículo ao utilizar o conjunto espelho retrovisor externo com base de liga de alumínio e de aproximadamente 425,46 g por veículo ao utilizar o conjunto com base de compósito.

A base do espelho retrovisor foi fixada em um dispositivo, simulando a fixação no veículo, e foi aplicada uma força F , com velocidade de 12 mm/min, no sentido do eixo Z, até a ruptura da peça nas três configurações de materiais (liga de zinco, liga de alumínio e compósito) e os resultados obtidos são apresentados no gráfico 03.

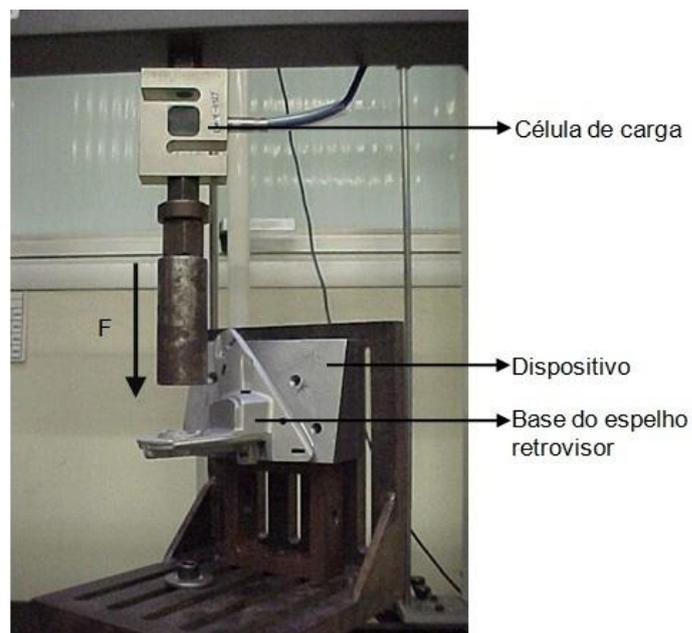
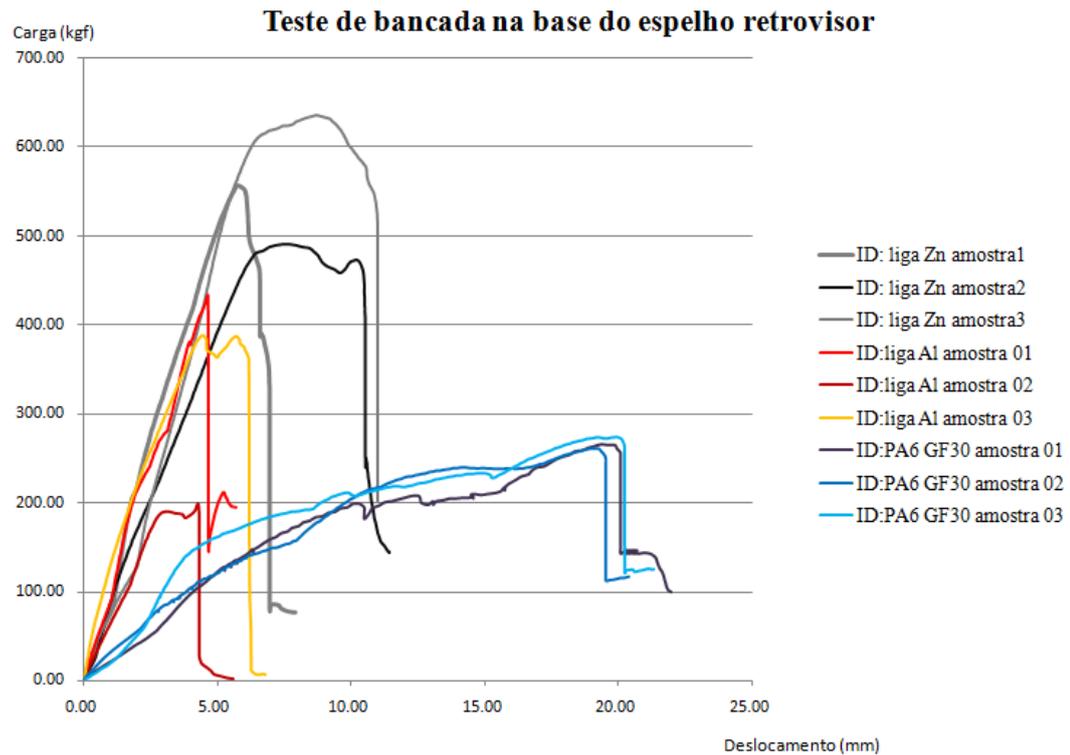


Imagem 09: Esquema do teste de bancada



Os resultados nos mostram o comportamento dos materiais submetidos a um esforço até a ruptura. Podemos observar uma instabilidade no comportamento das ligas metálicas comparadas ao comportamento da base em compósito quando submetidas a um esforço exacerbado até ocorrer à ruptura da peça.

4.4 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

Neste capítulo serão apresentados os resultados obtidos através dos ensaios realizados e das análises da topografia das amostras testadas.

4.4.1 Análise química

A análise química das ligas metálicas foi realizada utilizando o equipamento de espectrometria de emissão atômica com plasma de argônio acoplado, e os resultados para a

amostra da base do espelho com liga de zinco encontram-se na tabela 17, os resultados da amostra da base do espelho com liga de alumínio encontram-se na tabela 18. Para a liga de alumínio, o teor de silício foi analisado utilizando-se a técnica de via úmida. As tabelas apresentam a composição química das ligas metálicas analisadas.

Tabela 17: Composição química da amostra com liga de zinco

% Al	% Cu	% Fe	% Mg	% Pb
3,6413	0,84987	0,000477	0,031402	0,0027

Com os resultados obtidos concluímos que a composição química da peça corresponde à liga de zinco número 5.

Tabela 18: Composição química da amostra com liga de alumínio

% Si	% Fe	% Cu	% Mn	% Mg	% Cr	% Ni	% Zn	% Pb	% Ti
10,4	0,6561	1,0571	0,1755	0,0401	0,0156	0,0706	0,677	0,061	0,0287

A composição química da liga de alumínio não corresponde a liga A380.0, devido aos valores do silício e do cobre que estão abaixo da especificação da referida liga.

As amostras foram recebidas com a informação de que o material injetado era a liga de alumínio A380.0, após esta análise chega-se a conclusão que a injeção das peças teve contaminação de material e a peça está com o material fora do especificado.

4.4.2 Identificação do polímero através do sistema espectrofotométrico de infravermelho

Para caracterizar o polímero utilizado no compósito, a poliamida 6, utilizamos a técnica da espectrofotometria de infravermelho, onde, por comparação com um padrão, verificamos que a amostra da base em compósito foi injetada com o polímero poliamida 6.

A figura 27 mostra dois espectros, sendo, padrão de poliamida 6 (espectro azul) e amostra da base compósito (espectro preto), estes espectros nos mostram que a amostra da base em compósito utilizou o material poliamida 6.

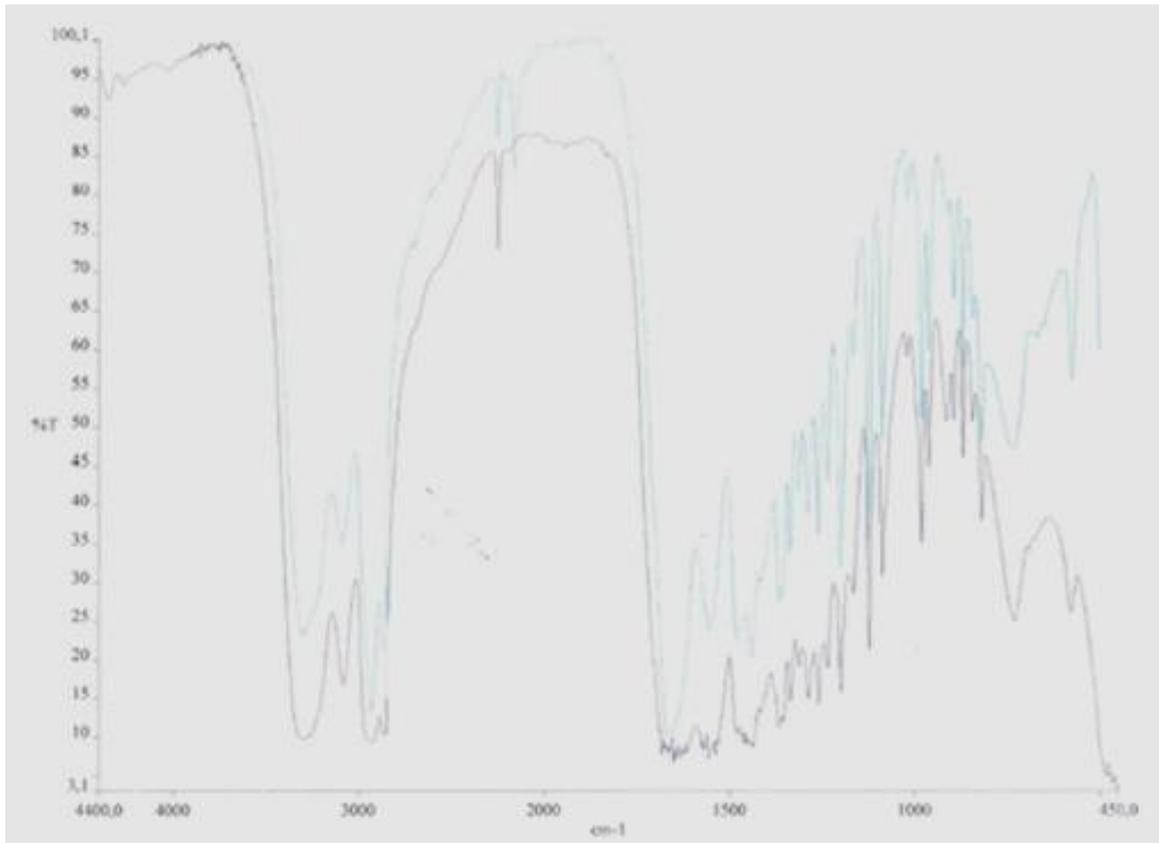


Figura 27: Espectrofotometria por infravermelho da amostra da base em compósito.

4.4.3 Propriedades físicas dos materiais

Algumas propriedades físicas dos materiais foram obtidas da literatura, o valor da densidade do compósito foi obtido das amostras das bases após os testes de bancada e a tabela 19 mostra os valores compilados.

A norma utilizada para a determinação da densidade do compósito foi a ISO1183, já para os valores da densidade das ligas de alumínio e zinco utilizamos as referências das especificações GMW5 e GMW3341 e da literatura (ASM, 1992).

Tabela 19: Propriedades físicas dos materiais

Material	Liga Zn 5	Liga Al A380.0	PA6-FV30
Densidade (g/cm ³)	6.7	2.7	1.36

A análise do teor de carga do compósito, conforme norma ISO3451, após os testes de bancada onde obteve-se os valores apresentados na tabela 20 abaixo.

Tabela 20: Teor de carga das amostras da base em compósito

Amostra	Unidade	resultados
Amostra 01	%	29.13
Amostra 02	%	28.92
Amostra 03	%	30.4

4.4.4 Ensaio de flexão três pontos

Os resultados obtidos por meio do ensaio de flexão três pontos encontram-se na tabela 21, estes ensaios foram realizados com o intuito de verificar-se os valores reais do material comparando os resultados do compósito com relação à análise virtual, onde foram considerados os valores mínimos da especificação do material, utilizado como referência na análise virtual do espelho retrovisor externo.

As dimensões dos corpos de prova utilizados estavam conforme norma ISO178, L=80 mm, B= 10 mm e h=4 mm e a velocidade de ensaio de 2 mm/min. Conforme informação técnica do produto.

Tabela 21: Resultados dos ensaios de flexão três pontos conforme ISO178

Amostra	Módulo de Flexão (Mpa)	Carga máxima (N)	Resistência a flexão (Mpa)
1	7376.397	387.043	225.285
2	7887.070	386.295	224.850
3	7688.475	385.015	224.105
4	6638.757	384.778	223.967
5	7291.284	391.145	227.673
6	7234.543	387.828	225.742
7	7716.846	391.197	227.703
8	7972.182	385.640	224.468
9	7262.914	389.066	226.463
10	7546.621	388.756	226.282
Media	7461.509	387.676	225.654
desvio pd.	390.148	2.345	1.365

4.4.5 Análise metalográfica

As análises metalográficas das amostras foram realizadas nas bases em metal e as amostras foram retiradas aleatoriamente das peças. A imagem 10 a seguir corresponde a liga de zinco número 5

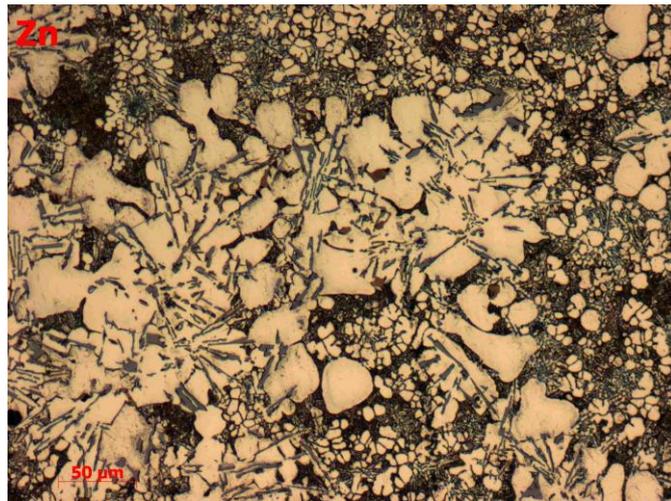


Imagem 10: Microestrutura da liga de zinco número 5

A imagem 10 da liga de zinco número 5 apresentou dendritas ricas em zinco em uma matriz de α +Al fase eutética e agulhas de compostos complexos de cobre (Cu), magnésio (Mg) e alumínio (Al). A imagem seguinte corresponde a liga de alumínio.

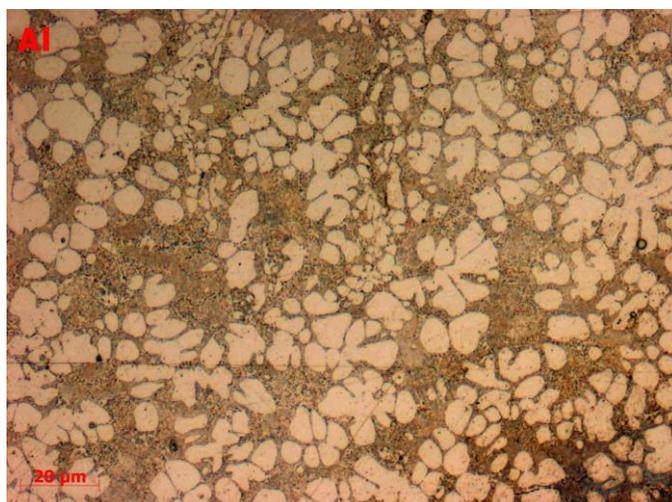


Imagem 11: Microestrutura da liga de alumínio

A imagem 11 da liga de alumínio apresentou dendritas de alumínio (Al) com eutético de Al-Si e partículas finas de silício. O ataque foi feito com ácido fluorídrico (HF)

4.4.6 Fractografia

Após os testes de bancada as peças foram analisadas em suas faces de fratura. As peças após testes de bancada tiveram a ruptura conforme demonstrado nas imagens 12 e 13 para as peças injetadas com liga de zinco número 5,



Imagem 12: Base liga Zn



imagem 13: Região da ruptura

A análise fractográfica da face da fratura apresenta-se nas imagens 14 e 15

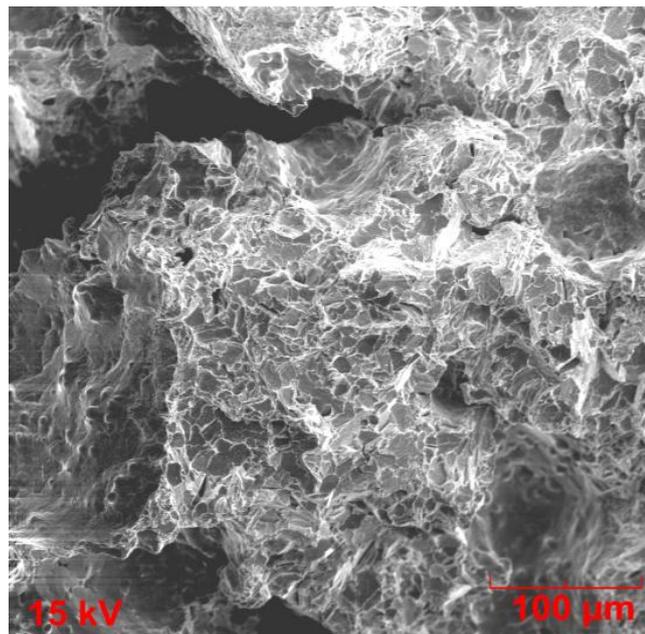


Imagem 14: Superfície de fratura liga de zinco número 5 (aumento aproximado de 100x)

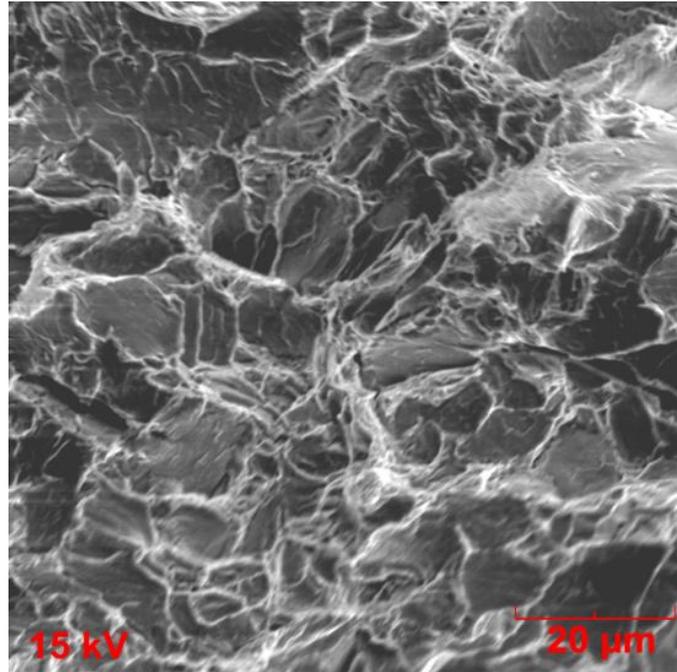


Imagem 15: Superfície de fratura liga de zinco número 5 (aumento aproximado de 1000x)

A análise das imagens anteriores indicam a predominância do mecanismo de quase-clivagem com rara presença de alvéolos

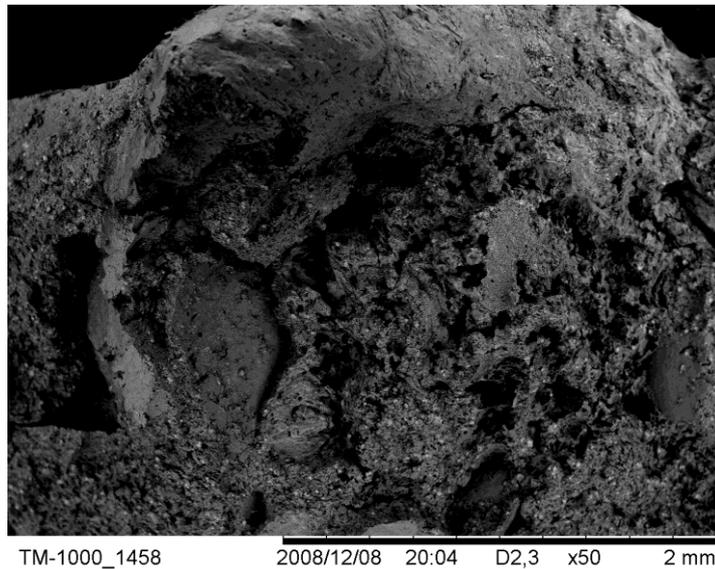


Imagem 16: Região aleatória da peça em Zn (aumento aproximado de 50x)

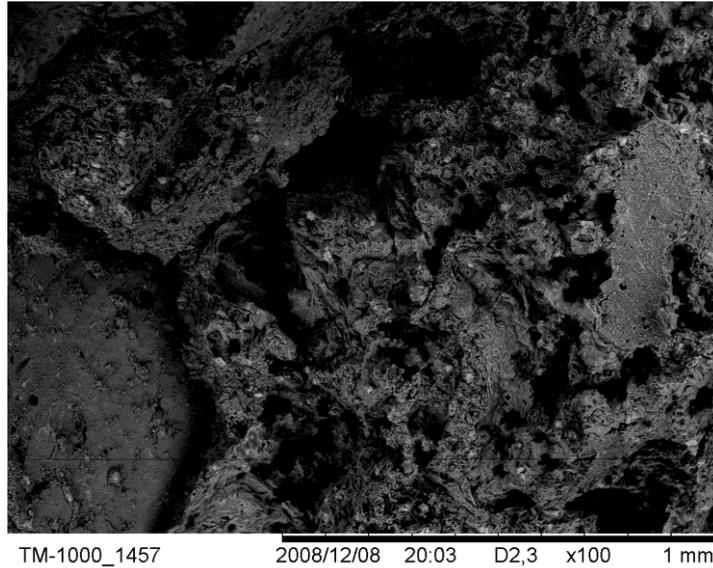


Imagem 17: Região aleatória da peça em Zn (aumento aproximado de 100x)

Uma outra região escolhida aleatoriamente, e que não sofreu carregamento foi analisada onde pode-se observar a porosidade, inerente ao processo de injeção da peça nas imagens 16 e 17.

As peças injetadas com liga de alumínio, após os testes de bancada, tiveram a ruptura conforme demonstrado nas imagens 18 e 19.



Imagem 18: Base liga Al



Imagem 19: Região da ruptura

A análise fractográfica da face da fratura apresenta-se nas imagens 20 e 21

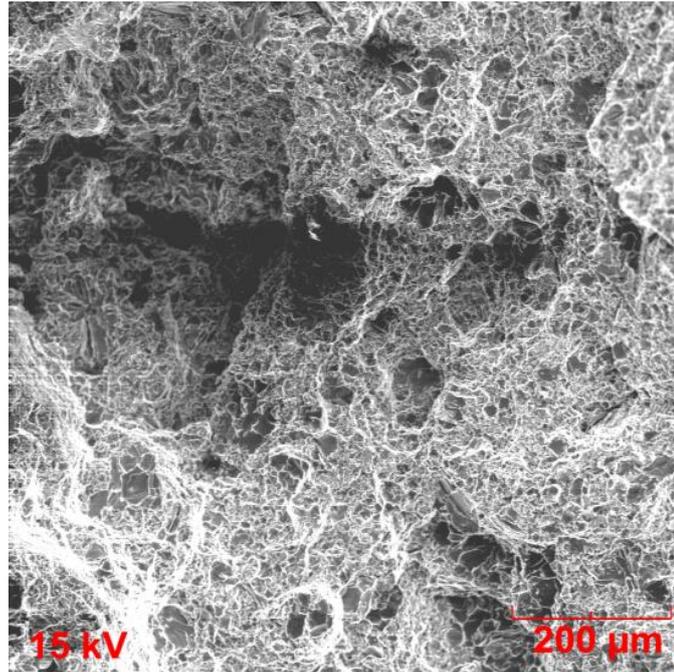


Imagem 20: Superfície de fratura da liga de Al (aumento aproximado de 100x)

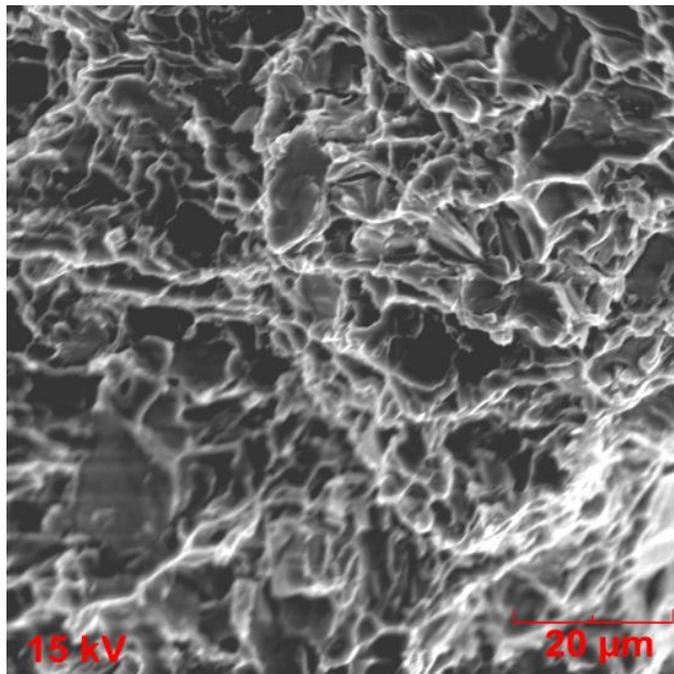


Imagem 21: Superfície de fratura da liga de Al (aumento aproximado de 1000x)

A análise das imagens anteriores indica predominância de alvéolos com pouca quase-clivagem.

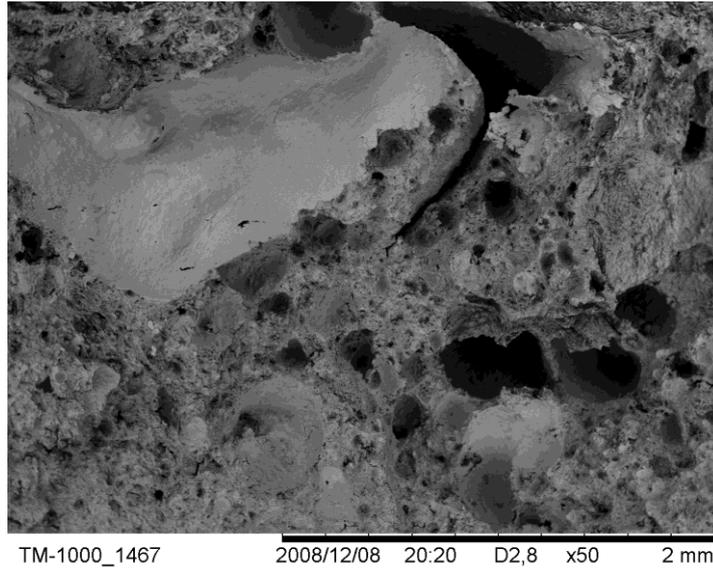


Imagem 22: Região aleatória da peça em Al (aumento aproximado de 50x)

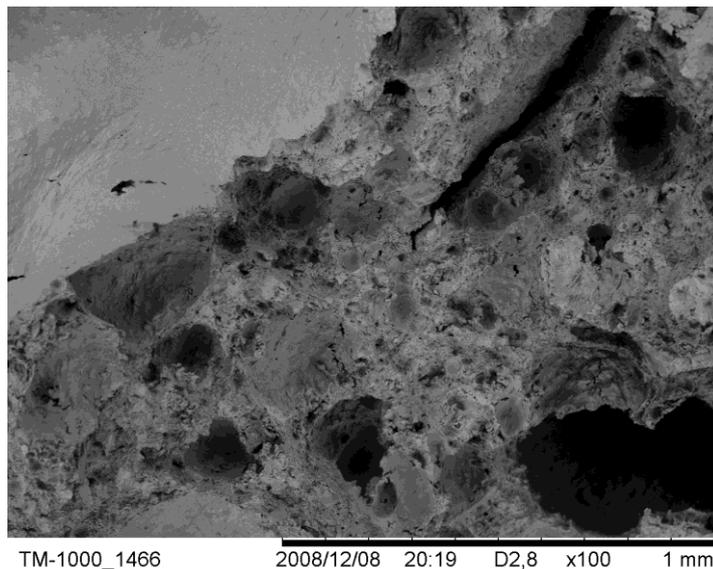


Imagem 23: Região aleatória da peça em Al (aumento aproximado de 100x)

Uma outra região escolhida aleatoriamente, e que não sofreu carregamento foi analisada onde pode-se observar a porosidade, inerente ao processo de injeção da peça nas imagens 22 e 23.

As peças em compósito (poliamida 6 com 30% de reforço de fibra de vidro) apresentaram a falha em uma região diferente das peças metálicas, obedecendo segundo análise virtual uma região de concentração de tensões, porém menos crítica. As imagens 24 e 25 mostram a região da base em compósito onde ocorreu a trinca.



Imagem 24: Base compósito



Imagem 25: Região da fratura

A análise fractográfica da face da fratura pode ser vista nas imagens 26 a 29

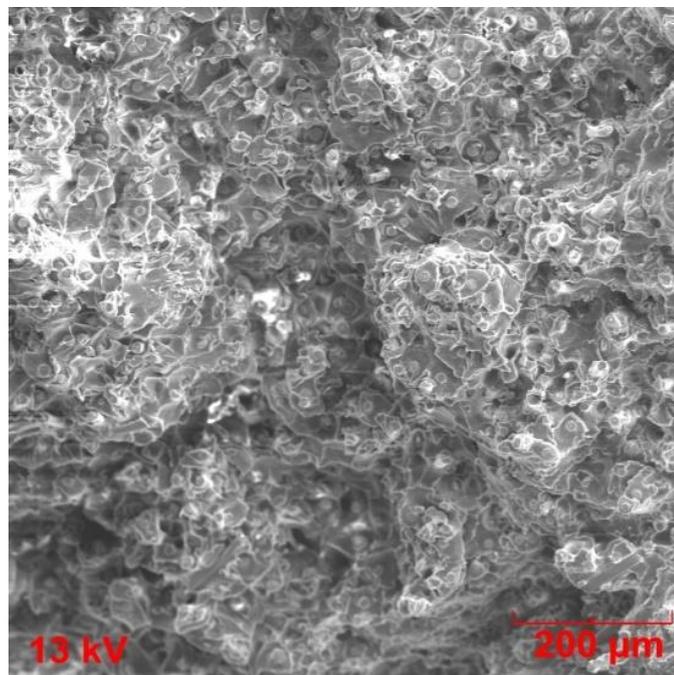


Imagem 26: Superfície de fratura do compósito (aumento aproximado de 100x)

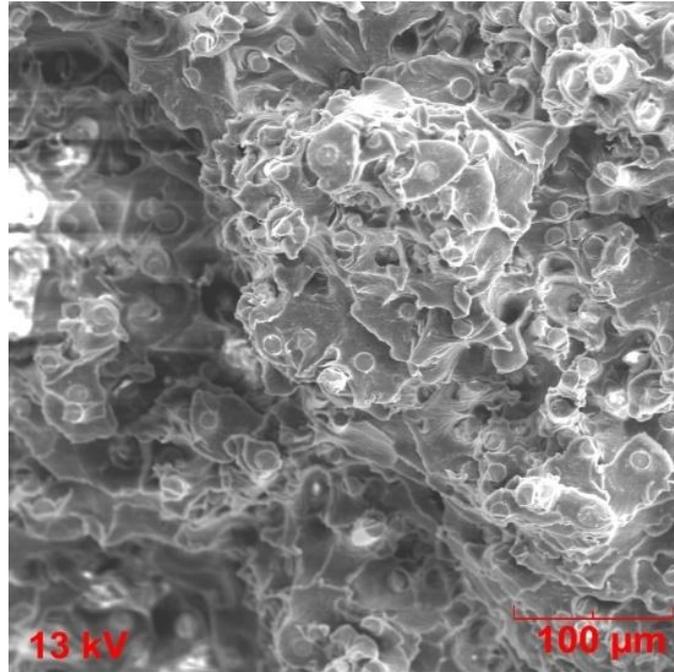


Imagem 27: Superfície de fratura do compósito (aumento aproximado de 200x)

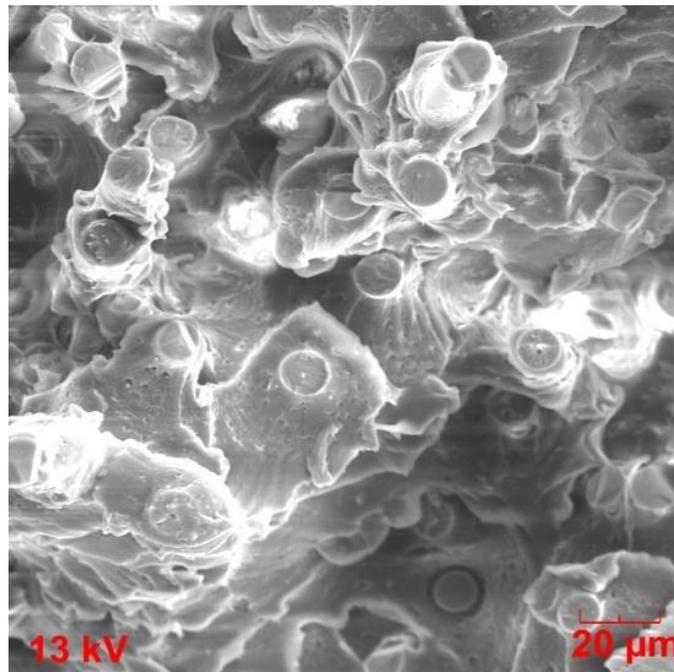


Imagem 28: Superfície de fratura do compósito (aumento aproximado de 500x)

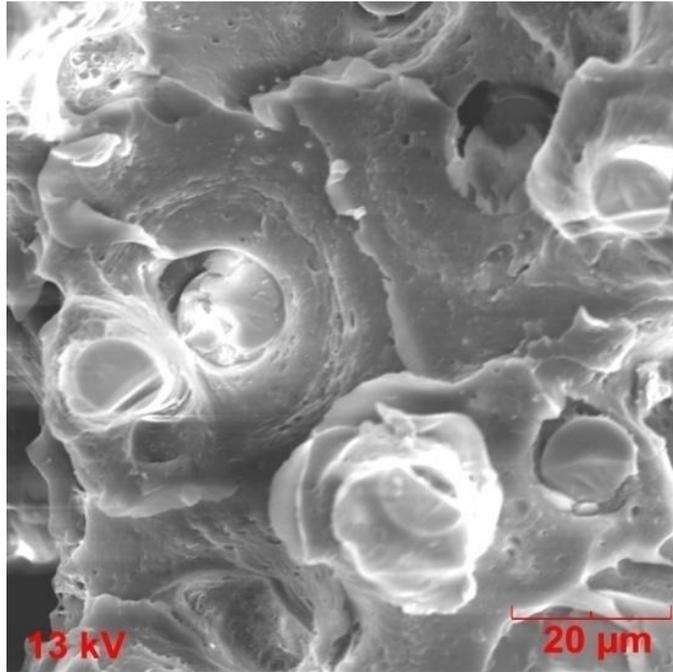


Imagem 29: Superfície de fratura do compósito (aumento aproximado de 1000x)

A análise da face da fratura da peça em compósito permite concluir que a interface matriz / fibra está com boa adesão. Esta interação entre as fases do compósito é muito importante para garantir a resistência mecânica da peça acabada.

Pode-se observar nas imagens da face da fratura do compósito, que as fibras estão bem acopladas na matriz do polímero, visto que não se observa fibras destacadas. Estas imagens mostram que o início da ruptura do compósito começou a medida que as fibras passaram a fraturar, mesmo após a fratura das fibras a matriz ainda continua intacta pois as fibras fraturadas ainda estão inseridas no interior da matriz, e, conseqüentemente, ainda capazes de suportar uma carga reduzida enquanto a matriz continua seu processo de deformação plástica.

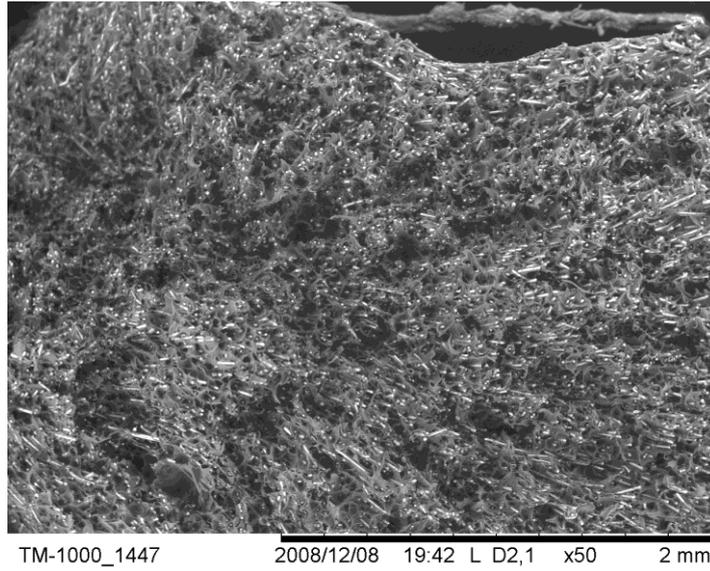


Imagem 30: Região aleatória da peça em compósito (aumento aproximado de 50x)

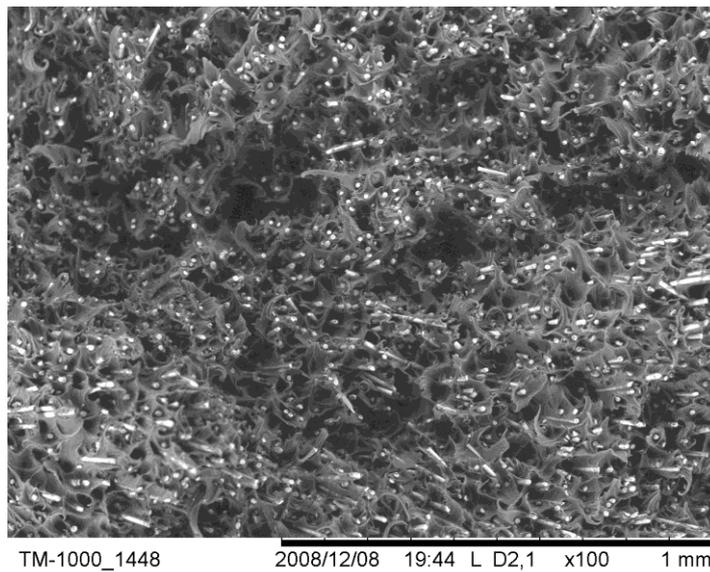


Imagem 31: Região aleatória da peça em compósito (aumento aproximado de 100x)

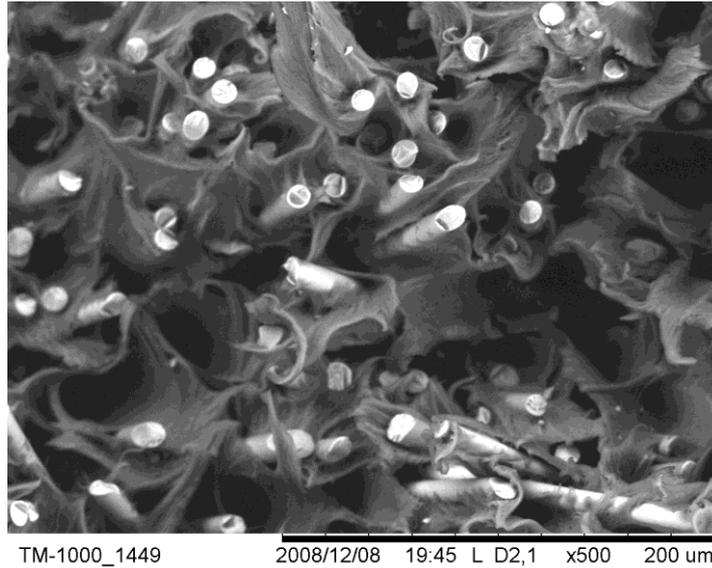


Imagem 32: Região aleatória da peça em compósito (aumento aproximado de 500x)

Outra região na peça que não sofreu carregamento foi analisada e nas imagens 30, 31 e 32 pode-se observar que as fibras estão distribuídas aleatoriamente e uniformemente dentro das três dimensões no espaço.

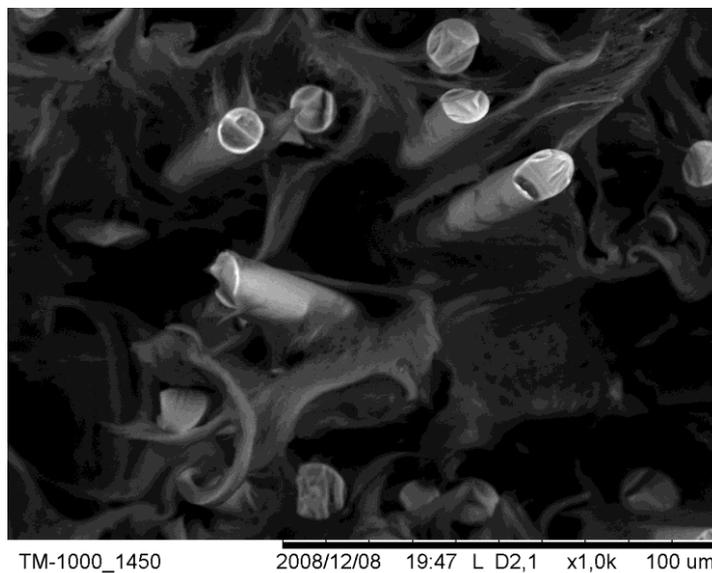


Imagem 33: Região aleatória da peça em compósito (aumento aproximado de 1000x)

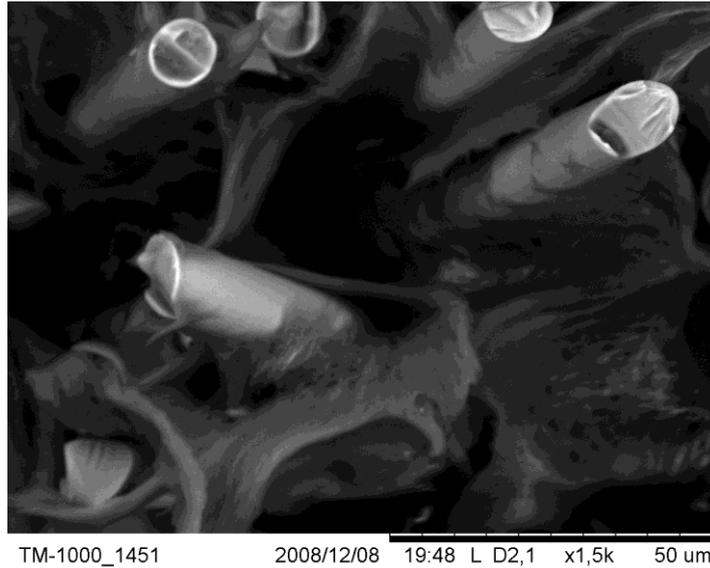


Imagem 34: Região aleatória da peça em compósito (aumento aproximado de 1500x)

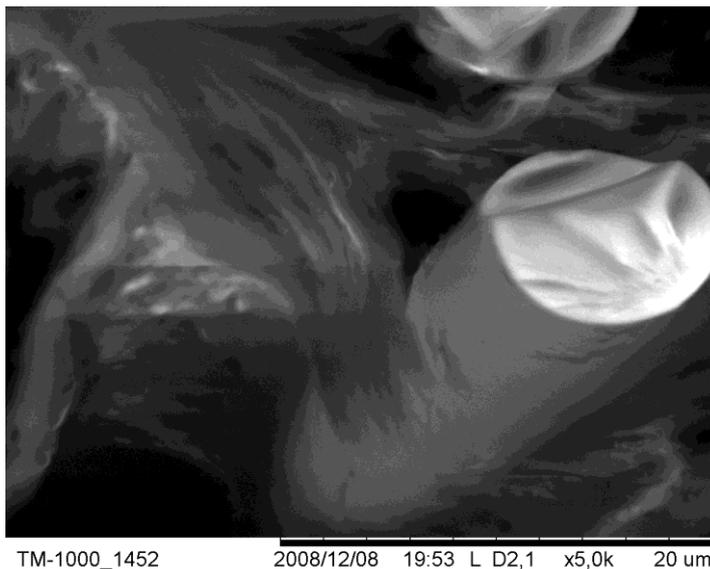


Imagem 35: Região aleatória da peça em compósito (aumento aproximado de 5000x)

Nas imagens 32, 33 e 34 pode-se observar que houve interação entre as fases fibra / matriz polímero.

4.5 DISCUSSÃO GERAL

O presente estudo visa elucidar qual a melhor relação entre vibração, resistência, peso e custo, levando em consideração os requisitos de validação, as propriedades dos materiais, o custo de matéria prima e a vida útil do ferramental, utilizando testes virtuais como referência e testes físicos para comparação de resultados.

Os resultados da análise virtual para a 1^a e para a 2^a frequência natural nos mostrou que a configuração sugerida com a base em compósito (PA6-FV30) apresentou resultados inferiores à configuração da base em metal e cobertura da base em polímero, devido à menor rigidez (módulo) do material comparado aos metais. Quando se compara os três materiais após a análise virtual, obtém-se os valores da frequência natural, densidade, custo de matéria prima e as razões frequência:custo e frequência:peso custo. Chega-se à conclusão que quando é levado em consideração somente o custo, a liga de alumínio leva vantagem sobre a liga de zinco e o compósito se torna a pior opção. Quando se considera o custo e o peso, o compósito leva vantagem sobre as ligas de alumínio e de zinco.

A melhor configuração encontrada no estudo é a que utiliza liga de alumínio na base, porém a vida útil do ferramental deve ser avaliada, pois a liga de alumínio, devido a sua temperatura de injeção elevada (635 a 705 °C), quando comparada com a liga de zinco (395 a 425 °C) ou o compósito (280 °C), diminui a vida útil do ferramental, e como consequência, um número inferior de peças serão injetadas e impactará na relação custo benefício, pois um novo molde deverá ser construído para atender a demanda, enquanto que para a liga de zinco e para o compósito este custo extra não será necessário.

Para obter-se um resultado satisfatório no teste de vibração (frequência natural) similar ao da base em metal, teria-se que utilizar um material com um módulo maior que 12 GPa. Uma sugestão de material com o melhor custo benefício a ser utilizado para esta aplicação seria a poliamida 6 com reforço de 50% de fibra de vidro, porém ao utilizar este material outros aspectos devem ser avaliados, a aparência após injeção e a resistência a intempéries (raios ultra violeta) são fatores que devem ser considerados.

Uma alternativa seria estruturar a base em compósito para melhorar a rigidez da peça e com isso alcançar o mesmo nível de vibração (frequência natural) da base em metal, esta alternativa deve ser tratada em futuros trabalhos na indústria automobilística.

5 CONCLUSÃO

A face da fratura na base injetada com a liga de zinco número 5 apresentou predominância do mecanismo de quase-clivagem com rara presença de alvéolos.

A face da fratura na base injetada com a liga de alumínio apresentou predominância de alvéolos com pouca quase-clivagem.

A face da fratura do compósito mostrou uma força de ligação adesiva entre a matriz e a fibra muito grande.

O ensaio de bancada mostrou que a instabilidade dos metais é maior, baseado nos resultados apresentados. Observou-se porosidade nas peças em metal (Zn e Al), que é inerente ao processo de injeção.

Os ensaios virtuais podem ser considerados válidos, pois os testes físicos apresentaram resultados dentro da tolerância adotada.

Observou-se uma diferença na região da fratura entre as bases em metal e compósito, a região mais crítica na análise virtual correspondeu ao ensaio em bancada para as bases em metal (liga de zinco e liga de alumínio), porém para a base em compósito observou-se que a fratura ocorreu na região menos crítica. Esta característica demonstra que o compósito tem uma estrutura complexa com propriedades médias ao longo da peça e a análise virtual considera a estrutura com característica constante ao longo da peça, esta característica não pode ser prevista quando se realiza o teste virtual.

A substituição da liga de zinco número 5 por compósito, para esta configuração apresentada, não é viável, pois ocorrerá perda na frequência natural de vibração, característica de alta percepção para os motoristas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABAL – Associação Brasileira do Alumínio

<http://www.abal.org.br/aluminio/introducao.asp> Acesso em 22/05/2008

http://www.abal.org.br/aluminio/propriedades_mecanicas.asp Acesso em 24/05/2008

<http://www.abal.org.br/aluminio/ligas.asp> 24/05/2008 Acesso em 24/05/2008

AGARWAL, B.D.; Broutman, I. J. - Analysis and Performance of Fibers Composites, 2ª Edição, 1990

ASHBY, Michael F.; JONES, David R. H. - Engenharia de Materiais. Uma Introdução a Propriedades, Aplicações e Projeto. Volume I. 3ª Edição, 2007, 368p.

ASHBY, Michael F.; JONES, David R. H. - Engenharia de Materiais. Volume II, 3ª Edição. 2007. 436p.

ASHBY, Michael F.; KARA, Johnson - Materials and design: the art and science of material selection in product design - Butterworth-Heinemann, 2007

ASM Handbook, Volume 2 ASM International, 9ª Edição, 1992.

ASM Handbook, Volume 9 ASM International, 9ª Edição, 1992.

ASM Handbook, Volume 12 ASM International, 9ª Edição, 1992.

CANEVAROLO JUNIOR, Sebastião V. – Técnicas de caracterização de polímeros – Artliber, 2003

CALLISTER, William D. Ciência e Engenharia de Materiais: Uma introdução, 5ª Edição 2002

CBA – Companhia Brasileira de Alumínio

<http://www.cia-brasileira-aluminio.com.br/pt/processos.php> Acesso em 22/05/2008

CHANDA, Manas; ROY, Salil K. - *Plastics Technology Handbook*, Taylor and Francis group, 2007

CHAWLA, K. K. – “*Composite Materials*”: Science and Engineering”, 2nd edition Springer-Verlag, New York, (1998)

CHEREMISINOFF, Nicholas P. - *Polymer characterization : laboratory techniques and analysis* / by Nicholas P. Cheremisinoff. - Noyes Publications 1996

DU PONT

<http://www.heritage.dupont.com/> Acesso em 26/05/2008

EAA – European Aluminium Association

<http://www.eaa.net/en/about-aluminium/production-process/> Acesso em 25/05/2008

ENCICLOPEDIA Handbook, *Modern Plastics Magazine*, McGraw Hill 1994

GOMES, Mário Rennó – *Emprego de alumínio e suas ligas*, Associação Brasileira de Metais ABM, 1976

HIGGINS, Raymond Aurellius – *Propriedades e estruturas dos materiais em engenharia*, DIEFEL. 1982

HULL, D. & CLYNE, T. W. – “*An Introduction to Composite Materials*”, 2nd. edition, Cambridge Univ. Press, Cambridge. 1999

JONES, F.R. – “*Handbook of Polymer-Fibre Composites*”. Polym. Sci. & Tec. Series. Longman Group UK. London 1994

KATZ, H. S. & MILEWSKI, J. V. – “*Handbook of Fillers and Reinforcements for Plastics*”. Van-Nostrand Reinhold, New York, 1978

KOHAN, M.I. *Nylon Plastics Handbook*, New York: Hanser, 1995

MAEDER G. "Le choix des matériaux dans l'industrie automobile", présenté au Colloque SF2M *Les Méthodes de choix de matériaux*, no INSA Lyon, en nov. 1997 et publié en *Matériaux et Techniques*, N°7-8, pp. 39-47, 1998

MALLICK, P.K.; Decker M. *Fiber Reinforced Composites*, 1998

MANUAL das ligas de alumínio, em sistema métrico. Sao Paulo: Aluminum Import 130 P.[S.I.:s.n.,2000?]

MARK, James E. - *Polymer Data Handbook*, Oxford university Press 1999

MAXWELL, J. – “The Drive for Plastics: Competing in Performance”, *Plastics and Rubber International*. Vol. 8, n°2, pp. 45-49, April (1983)

MAXWELL, J. - *Plastics in the automotive industry* 1994

MORGAN, S.W.K. – *Zinc and its alloys and compounds*, Ellis Horwood limited, 1985

PLUEDDEMANN, E.P. – “Silane Coupling Agents”, 2nd. edn.. Plenum Press. New York (1991).

RIVERS, J.T. - “Reinforcing Fibers for Advanced Polymer Composites”. *Shell Polymers*, Vol. 8 n°3. pp. 84-87. (1984).

SACCAGNO, Andrea Becacci, Patente PI 05182131A, 2005

SHACKELFORD, James F. - *Introduction to Materials Science for Engineers*. Fourth Edition. 1996. 670p.

SONG, Fuyin & AYORINDE, Emmanuel O. – Influence of material property on vibration characteristics of the automotive rearview mirror, *Journal of thermoplastic composite materials*, 2005

SMITH, William F. - *Princípios de Ciência e Engenharia dos Materiais*, 3^a Edição, 1998

TITOW, W. V. & LANHAM, B. J. - "Reinforced Thermoplastics", Applied. Science. Publications, London, (1985).

Serviço brasileiro de resposta técnica

<http://sbrtv1.ibict.br/upload/sbrt1956.pdf?PHPSESSID=7353151a99016c97e0d9f9829cb1b891>

acesso em 11/12/2008

WIEBECK, Hélio – Plásticos de Engenharia, Artliber editora, 2005

Livros Grátis

(<http://www.livrosgratis.com.br>)

Milhares de Livros para Download:

[Baixar livros de Administração](#)

[Baixar livros de Agronomia](#)

[Baixar livros de Arquitetura](#)

[Baixar livros de Artes](#)

[Baixar livros de Astronomia](#)

[Baixar livros de Biologia Geral](#)

[Baixar livros de Ciência da Computação](#)

[Baixar livros de Ciência da Informação](#)

[Baixar livros de Ciência Política](#)

[Baixar livros de Ciências da Saúde](#)

[Baixar livros de Comunicação](#)

[Baixar livros do Conselho Nacional de Educação - CNE](#)

[Baixar livros de Defesa civil](#)

[Baixar livros de Direito](#)

[Baixar livros de Direitos humanos](#)

[Baixar livros de Economia](#)

[Baixar livros de Economia Doméstica](#)

[Baixar livros de Educação](#)

[Baixar livros de Educação - Trânsito](#)

[Baixar livros de Educação Física](#)

[Baixar livros de Engenharia Aeroespacial](#)

[Baixar livros de Farmácia](#)

[Baixar livros de Filosofia](#)

[Baixar livros de Física](#)

[Baixar livros de Geociências](#)

[Baixar livros de Geografia](#)

[Baixar livros de História](#)

[Baixar livros de Línguas](#)

[Baixar livros de Literatura](#)
[Baixar livros de Literatura de Cordel](#)
[Baixar livros de Literatura Infantil](#)
[Baixar livros de Matemática](#)
[Baixar livros de Medicina](#)
[Baixar livros de Medicina Veterinária](#)
[Baixar livros de Meio Ambiente](#)
[Baixar livros de Meteorologia](#)
[Baixar Monografias e TCC](#)
[Baixar livros Multidisciplinar](#)
[Baixar livros de Música](#)
[Baixar livros de Psicologia](#)
[Baixar livros de Química](#)
[Baixar livros de Saúde Coletiva](#)
[Baixar livros de Serviço Social](#)
[Baixar livros de Sociologia](#)
[Baixar livros de Teologia](#)
[Baixar livros de Trabalho](#)
[Baixar livros de Turismo](#)