



ADEMIR FRANCISCO DE MELLO

**AVALIAÇÃO DA SUBSTITUIÇÃO DE MATERIAL DA CARÇAÇA DO
MOTORREDUTOR AUTOMOTIVO BASEADO EM SIMULAÇÃO NUMÉRICA**

Novo Hamburgo

2012

ADEMIR FRANCISCO DE MELLO

**AVALIAÇÃO DA SUBSTITUIÇÃO DE MATERIAL DA CARÇA DO
MOTORREDUTOR AUTOMOTIVO BASEADO EM SIMULAÇÃO NUMÉRICA**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado como requisito parcial à
obtenção do grau de Bacharel em
Engenharia Industrial Mecânica pela
Universidade Feevale.

Orientador: Angela Beatrice Dewes Moura

Novo Hamburgo

2012

ADEMIR FRANCISCO DE MELLO

Trabalho de conclusão do Curso Engenharia Industrial Mecânica, com título, AVALIAÇÃO DA SUBSTITUIÇÃO DE MATERIAL DA CARÇA DO MOTORREDUTOR AUTOMOTIVO BASEADO EM SIMULAÇÃO NUMÉRICA submetido ao corpo docente da Universidade Feevale, como requisito necessário para obtenção do Grau de Bacharel em Engenharia Industrial Mecânica.

Aprovado por:

Orientador: Dra. Angela Beatrice Dewes Moura

Professor avaliador: Dr. Eduardo Luis Schneider

Professor avaliador: Dra. Claudia Trindade Oliveira

Avaliador: Engº Pier A. Scheffel

Dedicatória

Dedico este trabalho a todos que estiveram ao meu lado em todos os momentos da minha graduação e, em especial a minha esposa Marinês.

Agradecimentos

A Deus por ter me permitido este momento.

A minha esposa Marinês Marques que esteve ao meu lado nos momentos de dúvida sempre me incentivando, por isso posso dizer obrigado, com todo meu amor.

Aos meus filhos Erik Luis de Mello e Kevin Marques de Mello, que sofreu a ausência do pai em muitas noites e hoje ainda perguntam em quais dias tenho folga.

Aos meus mestres que foram os responsáveis pelos ensinamentos passados e, muitos deles, aplicados neste trabalho. Em especial a minha orientadora Angela Beatrice Dewes Moura.

Aos meus colegas e amigos da Feevale, especialmente aos da Oficina Tecnológica.

À Feevale, pelas oportunidades disponibilizadas ao longo dos anos de faculdade e trabalho.

À Imobras Indústria de Motores Elétricos LTDA, nos momentos que precisei sair antes ou me ausentar, e também pela contribuição financeira, sem o qual a conclusão deste curso não seria possível.

RESUMO

A indústria automobilística desde o seu surgimento, investe constantemente em pesquisas com o objetivo de aperfeiçoar e melhorar as características dos materiais utilizados na construção dos automóveis e conseqüentemente seu desempenho de um modo geral. A necessidade de materiais mais leves e resistentes e de produção mais flexível tornou o polímero alvo destes estudos e aos poucos uns dos materiais mais utilizados pela indústria neste seguimento. Somente com a descoberta e o aprimoramento dos polímeros de engenharia e de alto desempenho é que se tornou possível a substituição dos materiais tradicionalmente utilizados pelo polímero. O motorreductor é utilizado, entre outras aplicações no limpador de para-brisas. Neste caso é responsável pelo acionamento do mecanismo de movimentação a partir de um motor elétrico. Ele é composto por motor elétrico, sistema de redução e uma carcaça de Al. A carcaça de alumínio, na empresa Imobras, tem apresentado problemas de qualidade, que tem gerado sucateamento e/ou retrabalho. Cabe lembrar que o fornecimento da peça é terceirizado. O objetivo deste trabalho é avaliar a possibilidade de substituição do alumínio da carcaça do motorreductor automotivo tamanho 04 da empresa Imobras, baseado em dados experimentais e de simulação numérica. Para alcançar os objetivos foi utilizado o pacote SolidWorks Motion® e o SolidWorks Simulation® para simulações de cargas dinâmicas e estáticas nos materiais propostos. Neste trabalho foram avaliados 4 materiais poliméricos: Poliacetal sem carga, Poliacetal com 30% de fibra de vidro, Poliamida com 33% de fibra de vidro e a Poliftalamida com 30% de fibra de vidro, devido ao fácil processamento e pode ser utilizado equipamento convencional. Salieta-se que os três primeiros apresentam a vantagem adicional de já serem utilizados na empresa, em outras peças. Os resultados mostraram que somente o Poliacetal sem carga não atendeu os requisitos estabelecidos. A seleção final baseada no estudo de viabilidade econômica mostrou que o Poliacetal e a Poliamida com carga foram os mais adequados para substituir o alumínio da carcaça do motorreductor. E o resultado do payback simples e descontado do projeto foi respectivamente de 10,28 e 10,73 meses para recuperar o capital investido, enquanto que o custo evitado anual será de R\$ 24.750,00. Portanto, a substituição sugerida é recomendada.

Palavras-chave: Motorreductor. Polímeros. Método de Elementos Finitos. SolidWorks.

ABSTRACT

The auto industry since its inception, constantly invests in research aiming to improve and enhance the characteristics of the materials used in the construction of automobiles and consequently their performance in general. The need for lighter and stronger materials and production become more flexible polymer such studies target and slowly over some of the materials used in industry for this follow up. Only with the discovery and improvement of engineering polymers and high performance is made possible replacement of materials traditionally used by the polymer. The gearbox is used, among other applications in the windshield wiper. This case is responsible for triggering the mechanism of moving from an electric motor. It consists of an electric motor, reduction system and an Al housing Aluminum housing in Imobras company, has presented quality problems, which has generated scrap and / or rework. It is worth remembering that the supply part is outsourced. The objective of this study is to evaluate the possibility of replacing the aluminum casting automotive gearbox size 04 Imobras company, based on experimental data and numerical simulation. To achieve the objectives package was used SolidWorks Motion ® and SolidWorks ® Simulation for simulations of static and dynamic loads on the materials proposed. This study evaluated four polymeric materials: Polyacetal unladen Polyacetal with 30% glass fibers, polyamide with 33% glass fiber and Polyphthalamide with 30% glass fiber, due to easy processing and conventional equipment can be used. It is noted that the first three have the additional advantage of already being used in the company in other parts. The results showed that only unloaded Polyacetal not met the requirements. The final selection based on economic feasibility study showed that Polyacetal and Polyamide charged were the most suitable to replace the aluminum gearbox housing. And the result of simple payback and discounted the project was respectively 10.28 and 10.73 months to recover the capital invested, while the annual avoided cost is U.S. \$ 24,750.00. Therefore, the suggested replacement is recommended.

Keywords: Motorreductor. Polymers. Finite Element Method. SolidWorks.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1: Sistema mecânico do limpador de para-brisas | 17 |
| Figura 2: Engrenagem parafuso sem-fim e coroa | 18 |
| Figura 3: Coroa e eixo sem-fim do motorreductor Imobras..... | 19 |
| Figura 4: Motorreductor - Limpador de para-brisas..... | 20 |
| Figura 5: Curva tensão x deformação do comportamento mecânico dos polímeros . | 31 |
| Figura 6: Classificação dos polímeros..... | 32 |
| Figura 7: Diagrama tensão x deformação para termopolímeros e termorrígidos | 33 |
| Figura 8: Curva de fluência para os polímeros..... | 36 |
| Figura 9: Influência do raio da ponta do entalhe na resistência ao impacto de alguns termopolímeros | 38 |
| Figura 10: Etapas para análise computacional pelo MEF | 47 |
| Figura 11: Modelo de peça em CAD e dividido em elementos..... | 50 |
| Figura 12: Elemento Tetraédrico e nós | 51 |
| Figura 13: Condição de Linearidade e Não Linear | 54 |
| Figura 14: Layout da empresa Imobras..... | 57 |
| Figura 15: Sistema de ensaio de durabilidade do limpador de para-brisas..... | 59 |
| Figura 16: Método medição temperatura no motorreductor | 60 |
| Figura 17: Desenho 3D do mecanismo de transmissão do limpador de para-brisas | 61 |
| Figura 18: Restrição de fixação e carga aplicada no Simulation | 61 |
| Figura 19: Comportamento da corrente elétrica mínima (A) e máxima (B) do motorreductor..... | 64 |
| Figura 20: Configuração do motor elétrico para simulação dos movimentos | 66 |
| Figura 21: Representação gráfica do Torque <i>versus</i> Tempo no estudo de movimento do motor elétrico..... | 67 |
| Figura 22: Representação gráfica da velocidade angular no estudo de movimento . | 68 |
| Figura 23: Representação gráfica da velocidade do motor elétrico no estudo movimento..... | 68 |
| Figura 24: Malha gerada para a simulação da carcaça..... | 70 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|---|----|
| Tabela 1: Propriedades Físicas do alumínio puro | 21 |
| Tabela 2: Principais ligas de alumínio trabalháveis | 24 |
| Tabela 3: Principais ligas de alumínio utilizadas em fundição | 25 |
| Tabela 4: Propriedade química liga 413/ 305 | 27 |
| Tabela 5: Propriedade mecânica e física liga 413 | 27 |
| Tabela 6: Classificação dos Polímeros | 30 |
| Tabela 7: Propriedades das Poliamidas | 40 |
| Tabela 8: Comparação das propriedades do PA 6 x Pa 6.6 | 41 |
| Tabela 9: Temperaturas limites de trabalho das Poliamidas 6 e 6.6 | 41 |
| Tabela 10: Propriedades mecânicas e físicas dos poliacetais | 42 |
| Tabela 11: Características mecânicas e físicas dos materiais utilizados no estudo.. | 63 |
| Tabela 12: Custo relativo dos polímeros selecionados | 63 |
| Tabela 13: Resultados da simulação nos materiais | 71 |

LISTA DE QUADROS

| | |
|--|----|
| Quadro 1: Lista de investimentos estipulado..... | 72 |
| Quadro 2: Cálculo custo hora máquina..... | 73 |
| Quadro 3: Índices de retorno..... | 73 |
| Quadro 4: Custo Evitado do projeto | 74 |

LISTA DE GRÁFICOS

| | |
|---|----|
| Gráficos 1: Comparação da vida útil de moldes usados em injeção sob pressão de ligas metálicas versus injeção de polímero | 28 |
| Gráfico 2: Desempenho do motorreductor com a faixa de torque de trabalho | 65 |
| Gráficos 3: Ensaio Térmico do Motorreductor..... | 69 |

SUMÁRIO

| | |
|--|-----------|
| INTRODUÇÃO | 13 |
| 1 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA..... | 16 |
| 1.1 MOTORREDUTOR AUTOMOTIVO..... | 16 |
| 1.1.1 Transmissão por coroa e parafuso sem-fim | 18 |
| 1.2 ALUMÍNIO | 21 |
| 1.2.1 Características e aplicações | 21 |
| 1.2.2 Ligas de Alumínio..... | 22 |
| 1.2.2.1 Ligas Trabalháveis..... | 23 |
| 1.2.2.2 Ligas Fundidas | 25 |
| 1.3 POLÍMEROS | 28 |
| 1.3.1 Classificação dos Polímeros | 29 |
| 1.3.2 Propriedades mecânicas dos polímeros | 33 |
| 1.3.2.1 Relação tensão-deformação..... | 33 |
| 1.3.2.2 Comportamento viscoelástico..... | 35 |
| 1.3.2.3 Fluência | 36 |
| 1.3.2.4 Fratura | 37 |
| 1.3.2.5 Efeito da temperatura | 37 |
| 1.3.2.6 Resistência ao impacto..... | 38 |
| 1.3.2.7 Fadiga..... | 39 |
| 1.3.2.8 Dureza | 39 |
| 1.3.3 Poliamida 6 e Poliamida 6.6..... | 39 |
| 1.3.4 Poliacetal (POM) | 42 |
| 1.3.5 Poliftalamida PPA | 43 |
| 1.4 MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS..... | 44 |
| 1.4.1 Análise de projetos..... | 46 |
| 1.4.2 SolidWorks Motion/ Simulation..... | 48 |
| 1.4.2.1 Conceitos básicos de análise | 50 |
| 1.4.2.2 Análise Estática Linear | 53 |
| 2 MATERIAIS E MÉTODOS | 55 |
| 2.1 METODOLOGIA ADOTADA..... | 55 |
| 3 ESTUDO DE CASO | 56 |
| 3.1 HISTÓRICO DA EMPRESA | 56 |
| 3.2 COLETA DE DADOS | 58 |

| | |
|---|-----------|
| 4 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS..... | 62 |
| 4.1 ANÁLISE DOS MOVIMENTOS..... | 64 |
| 4.2 ANÁLISE DO ENSAIO TÉRMICO..... | 69 |
| 4.3 ANÁLISE DA SIMULAÇÃO DE ELEMENTOS FINITOS..... | 70 |
| 4.4 ANÁLISE DE VIABILIDADE ECONÔMICA | 71 |
| CONSIDERAÇÕES FINAIS..... | 75 |
| REFERÊNCIAS..... | 77 |
| APÊNDICES | 81 |
| ANEXOS | 91 |

INTRODUÇÃO

O lançamento de novos produtos e a melhoria da qualidade dos produtos existentes são duas questões de grande relevância para a capacidade competitiva das empresas. Ambos compõem o que normalmente se chama de Desenvolvimento de Produto.

Nesse ambiente competitivo, caracterizado por intensa concorrência em nível global, pela emergência de mercados fragmentados e com consumidores cada vez mais exigentes e sofisticados, e por mudanças tecnológicas mais rápidas, diversificadas e transformadoras, as empresas estão sujeitas a pressões constantes para a melhoria da qualidade dos produtos (TOLEDO, 1994).

No caso de países em desenvolvimento, o Desenvolvimento de Produto se concentra essencialmente em adaptar e melhorar produtos existentes. As condições econômicas, tecnológicas e sociais desses países inibem a inovação radical e tornam as mudanças incrementais de fundamental importância para a competitividade de diversos segmentos industriais. Os novos produtos tendem a ser desenvolvidos nos países centrais e são difundidos nos demais países via transferência internacional de tecnologia. Segundo Frasman (1986), a atividade tecnológica no terceiro mundo tende a ser quase exclusivamente incremental, ao invés de "movedora-de-fronteiras", mas é preciso não subestimar a importância cumulativa da mudança tecnológica incremental.

A substituição de materiais tradicionais por polímero na indústria automobilística se deu de forma gradativa ao longo de vários anos, mas apenas nas duas últimas décadas é que o ritmo dessa substituição se acelerou. Razões diversas, tanto econômicas, quanto tecnológicas, influenciaram o andamento dessa mudança. As crises do petróleo de 1973 e de 1979 trouxeram a conscientização para o problema da escassez de combustível e para a vulnerabilidade do uso indiscriminado de recursos naturais de fontes não renováveis. Essas crises podem ser consideradas como o momento decisivo da tomada de posição quanto à construção de carros mais eficientes, seguros, confortáveis e que consomem menos combustível. Pode-se dizer, porém, que somente após a superação de limitações tecnológicas, com o desenvolvimento de polímeros de alto desempenho, é que os polímeros passaram a fazer parte essencial dos automóveis (HEMAIS, 2003).

A média de 30 Kg de polímeros empregada por veículo, na década de 70, passou a representar cerca de 180 quilos no final da década de 90 e estima-se que nos próximos anos esse valor ultrapasse os 200 quilos. A questão que ora se levanta, a partir do uso de polímeros na indústria automobilística, é sobre a disponibilidade de fornecimento de matérias primas por parte da indústria de polímeros no Brasil (HEMAIS, 2003).

Em decorrência desta acentuada demanda, observa-se um interesse crescente por estudos que permitam caracterizar o comportamento das estruturas termoplásticas, tendo em vista, principalmente seu comportamento peculiar quando solicitado por esforços.

Com o advento dos computadores na segunda metade do último século, os métodos numéricos tornaram-se uma ferramenta de auxílio às soluções de problemas nas mais diversas áreas da engenharia, como análise estrutural e escoamento de fluidos. É possível prever o comportamento dos sistemas físicos, reduzindo custos de projeto e execução.

Entre os métodos numéricos, o método dos elementos finitos tem comprovada aplicação para a análise de problemas estruturais. Este método agrega um grande número de equações algébricas, cuja solução requer grandes recursos computacional para a obtenção dos resultados desejados.

Devido a isto, somente com o aperfeiçoamento dos computadores e com a otimização dos programas computacionais, foi possível a aplicação do método dos elementos finitos à resolução de problemas estruturais complexos.

Até meados da década de 1990 do século passado, os códigos computacionais eram complexos e desenvolvidos especialmente para a análise de um caso específico, exigindo um profundo conhecimento por parte do usuário. A aplicação destes códigos ficava restrita ao grupo que gerava os mesmos, fazendo com que fossem muito pouco difundidos no meio científico e industrial (CARVALHO, 2007).

Hoje em dia, a interface entre o usuário e o pacote computacional evoluiu acentuadamente, possibilitando a aplicação dos mesmos por um grande número de usuários em uma ampla gama de problemas. Entretanto, esta aplicação deve ser cautelosa a fim de evitar que sejam cometidos erros de análise. Neste contexto, a realização de estudos teóricos e experimentais é uma prática necessária à aplicação destas técnicas computacionais. Dentre estes sistemas destaca-se o pacote computacional *SolidWorks Simulation*®, que traz integrado em uma única plataforma o

modelamento da geometria, estudo de movimento e os resultados da simulação computacional pelo método dos elementos finitos da estrutura analisada.

Devido a uma grande demanda por melhoria de qualidade dos seus produtos, desde otimização de processos até qualidade final do produto, a empresa Imobras propõem a melhoria contínua para alcançar a excelência, buscando alternativas tecnológicas.

O motorreductor automotivo da Imobras tem como principal aplicação o limpador de para-brisas automotivo. Com isto, o objetivo do presente trabalho é verificar a possibilidade de troca do material da carcaça do motorreductor tamanho 04 da empresa Imobras, baseado em simulação numérica, utilizando o pacote computacional *SolidWorks Motion e Simulation*®.

O problema a ser estudado neste trabalho, visa analisar se há uma alternativa de material para substituir na carcaça do motorreductor Imobras, que suporte as tensões geradas, seja de fácil processamento e economicamente viável?

Para realizar o objetivo geral deste trabalho foram necessários os seguintes objetivos específicos:

- Realizar uma revisão bibliográfica a respeito dos itens pertinentes;
- Determinar materiais com propriedades mecânicas similares ao alumínio da carcaça do motorreductor;
- Desenvolver um modelo computacional para analisar as tensões e deformações do motorreductor, utilizando pacote *SolidWorks Simulation*®;
- Demonstrar a viabilidade econômica para substituição do alumínio pelo Polímero.

Este trabalho será apresentado na forma de um estudo de caso, visando a elaboração de um modelo computacional da melhor solução para atender as especificações e características do motorreductor automotivo. Através da realização deste trabalho também será possível adquirir maior conhecimento sobre análise de elementos finitos, polímeros de engenharia, cinemática dos movimentos e projeto de produto.

O presente trabalho será dividido em uma parte inicial referente ao embasamento teórico necessário para a resolução do estudo de caso, após este segue a metodologia utilizada e posteriormente o estudo de caso com a apresentação do modelo computacional, contendo a solução encontrada para substituição do material da carcaça do motorreductor Imobras.

1 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo aborda a revisão bibliográfica que serviu de base para análise dos elementos essenciais ao estudo de caso e para avaliar os materiais para a substituição do alumínio da carcaça do motorreductor automotivo baseado em simulação numérica da Empresa Imobras Ind. Motores Elétricos Ltda. Constará basicamente de uma abordagem do histórico e evolução do motorreductor automotivo, das ligas de alumínio, dos materiais poliméricos e suas características, e o por fim, do Método de Elementos Finitos (MEF), que é a ferramenta utilizada para avaliação do comportamento mecânico dos materiais para substituir o alumínio na carcaça do motorreductor.

1.1 MOTORREDUTOR AUTOMOTIVO

Os motorredutores automotivo têm como principal aplicação o limpador de para-brisas automotivo.

O limpador de para-brisas é um dispositivo mecânico que serve para manter a transparência do para-brisas, em caso de chuva, eliminando o excesso de água através de escovas de borracha, fixadas a suportes metálicos com movimento de vaivém (Figura 1), e é acionado por de um motor elétrico. Quando a chuva não for muito intensa a eficácia do limpador de para-brisas pode ser melhorada pela aplicação simultânea de jatos de água sobre o vidro para facilitar a limpeza. Praticamente todos os veículos a motor, incluindo trens, aeronaves e embarcações, são equipados com limpadores de para-brisas, que são geralmente obrigatórios por lei (COSTA, 2002).

O equipamento foi concebido em 1903 pela norte-americana Mary Anderson, entretanto, a inventora patenteou o produto apenas dois anos depois, em 1905. O projeto surgiu do estudo de Anderson sobre um recurso para melhorar a visibilidade durante um passeio de bonde pelas ruas de Nova York (EUA).

A figura 1 apresenta o funcionamento do sistema mecânico do limpador de para-brisas.

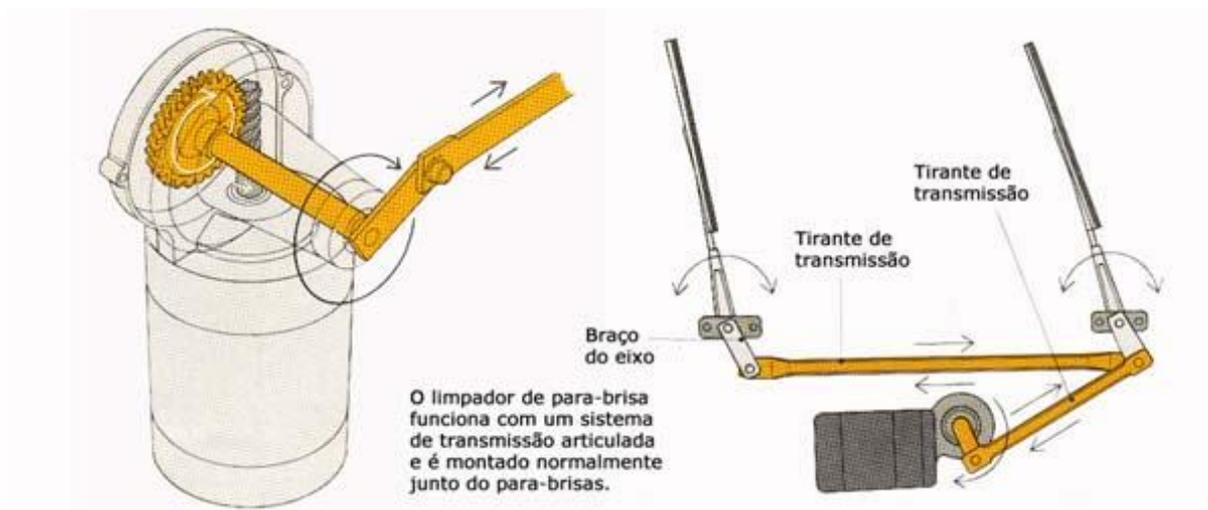


Figura 1: Sistema mecânico do limpador de para-brisas

Fonte: COSTA, 2002

Os limpadores de para-brisas são acionados por um pequeno motor elétrico. Este põe em movimento um mecanismo de engrenagem e manivela que converte o movimento rotativo num movimento alternativo, necessário para acionar a haste das palhetas. O comprimento da manivela e, em alguns modelos, a transmissão mecânica condiciona o funcionamento angular das palhetas. Além do interruptor do limpador de para brisa, que se encontra no painel, existe outro interruptor ligado ao conjunto da manivela. Quando o motorista desliga o interruptor dos limpadores de para-brisa estes continua funcionando até atingirem a posição de repouso, o que é possível graças ao sistema de dois interruptores. Alguns motores de limpador de para brisas apresentam também um termostato. Assim, se os limpadores de para-brisas ficarem detidos em qualquer posição, devido ao gelo ou à neve, o motor não se queimará tentando movê-los. Motores de duas velocidades permitem que as palhetas se movam mais lentamente ou mais rapidamente (COSTA, 2002).

O temporizador do limpador de para-brisas foi criado e desenvolvido pelo inventor americano Robert Kearns em 1964, porém só foi mundialmente comercializado a partir de 1969 pelo fato do inventor ter passado por um turbulento processo contra a Ford Motor Company pela patente do produto de sua autoria.

O primeiro modelo era na verdade uma "régua de limpeza", que funcionava manualmente. Depois veio o limpador de para-brisas operado pneumaticamente, que limpava mais lentamente à medida que o veículo aumentava a velocidade. Hoje, após tantos anos de desenvolvimento, os sistemas mais recentes do limpador de para-brisas têm sensor de chuva automático e unidades de acionamento eletronicamente

controladas, que oferecem a maior área limpa possível, mesmo com forte vento de frente (BOSCH, 2012).

1.1.1 Transmissão por coroa e parafuso sem-fim

O principal mecanismo mecânico responsável pelo torque de saída na ponta do eixo do motorreductor é a relação de transmissão por coroa e parafuso sem-fim, que é acionado pelo motor elétrico.

A transmissão por coroa e parafuso sem-fim é utilizada para grandes relações de transmissão entre dois eixos perpendiculares entre si, com redução de rotação da ordem de 40 a 100 vezes. Com o par de coroa e sem-fim pode-se transmitir grandes potencias e ocupar pequenos espaços em comparação com outros tipos de transmissões por engrenagem (ANTUNES E FREIRE, 1998).

Na figura 2 é apresentado o par de coroa e parafuso sem fim.

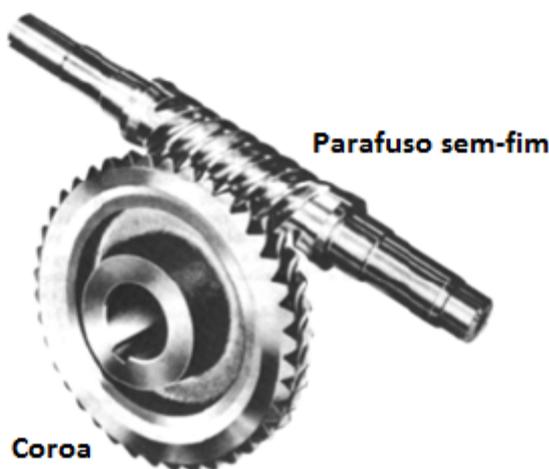


Figura 2: Engrenagem parafuso sem-fim e coroa

Fonte: GASPARIN, 2004

As engrenagem parafuso sem-fim e coroa são empregados para eixos reversos com rendimento de 45 a 97%, diminuindo com o aumento da relação de multiplicação e com a diminuição da velocidade de deslizamento. São mais silenciosas e amortecem melhor as vibrações do que qualquer outro tipo de transmissão por engrenagens, e para

grandes relações de multiplicação são em geral mais baratas do que as outras (NIEMANN, 1995).

Os materiais de construção da engrenagem podem ser metálicos e também poliméricos. A aplicação da engrenagem parafuso e coroa é o que vai determinar o tipo de material aplicado.

As propriedades necessárias desse tipo de engrenagem devem ser suficientes para suportar a potência exigida pelo equipamento fabricado com esse mecanismo (GASPARIN, 2004).

No caso do motorreductor em estudo é utilizado parafuso sem-fim ou neste caso eixo sem-fim em aço AISI 1020 com endurecimento nos dentes de contato, sendo o eixo do motor elétrico, conforme figura 3, e a coroa em Poliacetal (POM) com fluidez 8 injetado no eixo fabricado em aço AISI 1020 de saída do reductor.

Portanto, o material da carcaça de alojamento da engrenagem deve possuir resistência à flexão, à tração e principalmente a torção.

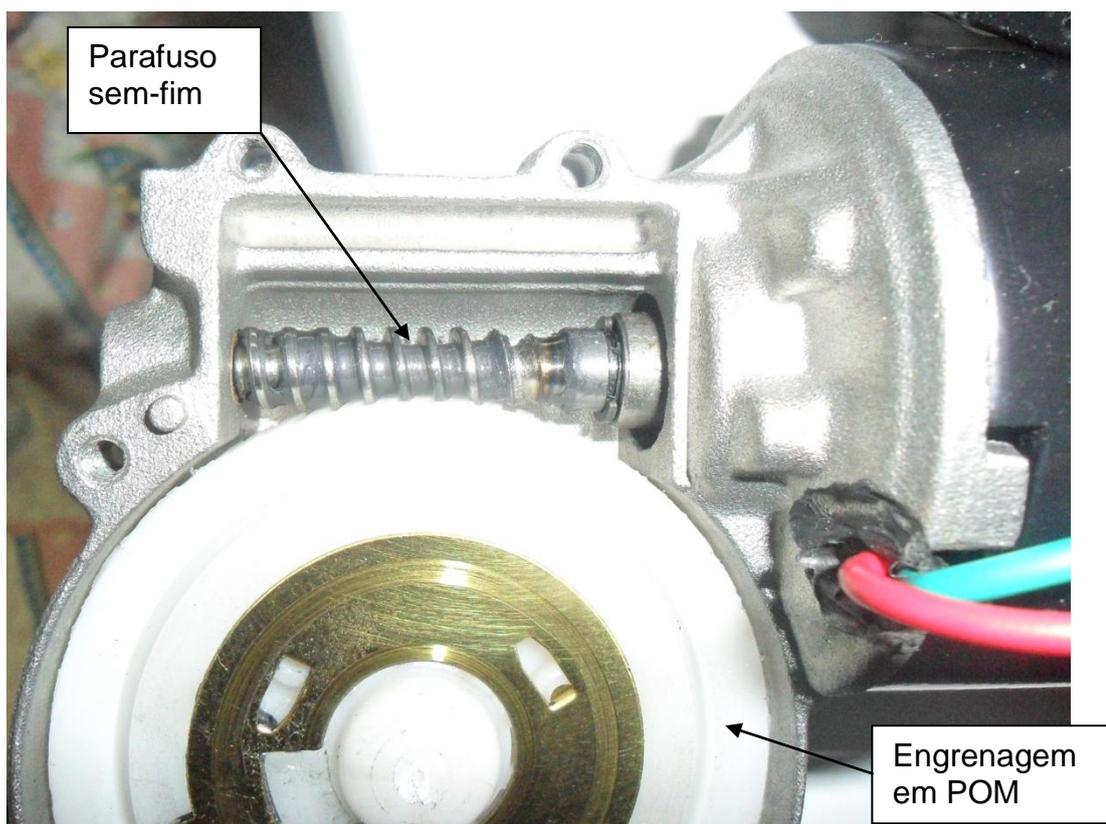


Figura 3: Coroa e eixo sem-fim do motorreductor Imobras

Fonte: Elaborado pelo autor

Além de limpador de para-brisas os motorredutores são versáteis e se adaptam às mais diversas aplicações. São vários modelos de motorredutores para aplicações

industriais, como máquinas têxteis, máquinas de embalagens de pequeno porte, lubrificadoras, contadoras de cédulas, máquinas para copiar chaves, balanças e automação industrial em geral.

A flexibilidade das aplicações é uma característica que se destaca nos motorreductores. Os motores limpadores de para-brisas, por exemplo, são utilizados também para acionamento de móveis, churrasqueiras elétricas, cadeiras de dentista, máquinas seladoras e máquinas lubrificadoras. Já o motor levantador de vidro possui aplicação em sistemas de abertura de trava baú, telas de projetos e varal elétrico, dentre outras, só para citar alguns exemplos (AUTO HOWSTUFFWORKS, 2012).

A figura 4 e o Anexo 1 corresponde a foto e ao desenho técnico do Motorreductor produzido pela Imobras:

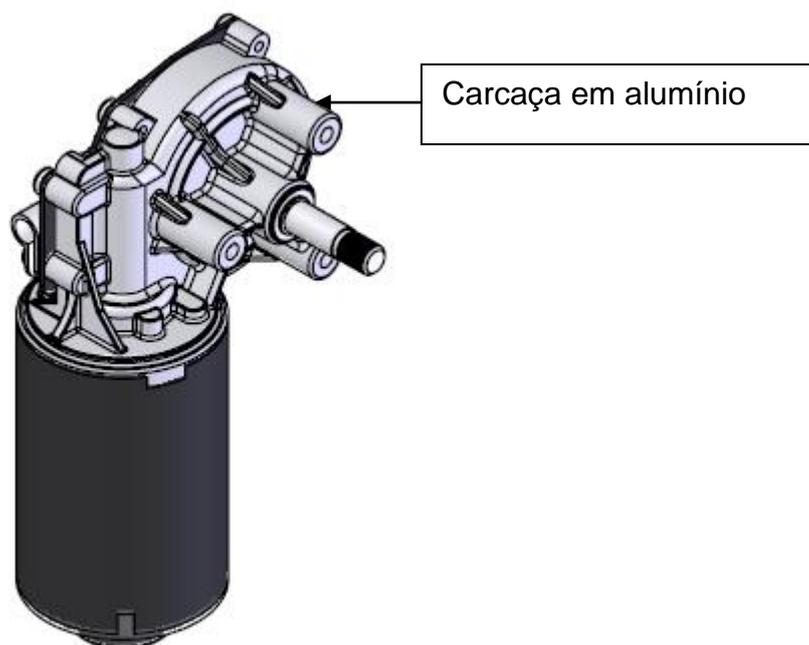


Figura 4: Motorreductor - Limpador de para-brisas

Fonte: Elaborado pelo Autor

O motorreductor para aprovação como limpador de para brisas deve atender aos requisitos mínimos de desempenho, conforme a Norma SAE J198.

1.2 ALUMÍNIO

As características do alumínio e a tecnologia moderna oferecem excelentes condições, com controles científicos adequados, para que se possam produzir grandes quantidades de peças mantendo uma qualidade uniforme. O mercado conta com excelentes ligas de alumínio que proporcionam uma grande variedade de propriedades para as peças fundidas. A tabela 1 resume algumas das propriedades físicas do alumínio puro.

Tabela 1: Propriedades Físicas do alumínio puro

| Propriedade | Unidade | Valor |
|--|---|--------------|
| Densidade, a 20 °C | g.cm^{-3} | 2,70 |
| Ponto de Fusão | °C | 660 |
| Calor específico a 100 °C, | $\text{cal.g}^{-1}\text{K}^{-1}$ ($\text{Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}$) | 0,2241 (938) |
| Calor latente de fusão, | cal.g^{-1} (kJ.kg^{-1}) | 94,7 (397.0) |
| Condutividade elétrica a 20°C | (% of international annealed copper standard) | 64,94 |
| Condutividade Térmica ^b | $\text{cal.sec}^{-1}\text{cm}^{-1}\text{K}^{-1}$ | 0,5 |
| Emissividade Térmica, a 100°F | (%) | 3,0 |
| Refletividade da luz, filamento tungstênio | (%) | 90,0 |

Fonte: COLLET, 2007

1.2.1 Características e aplicações

O alumínio e suas ligas constituem um dos materiais metálicos mais versáteis, econômicos e atrativos para uma vasta série de aplicações. Sua aplicação como metal estrutural só é menor que a dos aços. O alumínio possui uma densidade de $2,7 \text{ g/cm}^3$, aproximadamente 1/3 da do aço, o que somado a sua elevada resistência mecânica o torna bastante útil na construção de estruturas móveis, como veículos e aeronaves.

O alumínio não é ferromagnético, possui elevadas condutividades térmica e elétrica, e é atóxico. Outra vantagem do alumínio é a sua resistência à oxidação progressiva, já que os átomos da sua superfície se combinam com o oxigênio da atmosfera, formando uma camada de óxido protetor que impede a progressão da deterioração do material. Além disso, o alumínio com determinados tratamentos e / ou

elementos de liga se torna resistente à corrosão em meios mais agressivos. O alumínio também encontra aplicações em peças decorativas, graças a sua superfície brilhante e refletiva (COLLET, 2007).

O alumínio comercialmente puro tem uma resistência à tração de aproximadamente 90 MPa. Sua utilização como material estrutural nesta condição é um tanto limitada, mas através do trabalho a frio, sua resistência mecânica pode ser praticamente dobrada. Aumentos maiores na sua resistência podem ser obtidos com pequenas adições de elementos de liga, tais como: silício, cobre, manganês, magnésio, cromo, zinco, ferro etc.

Como o alumínio puro, as “ligas não tratáveis” podem também ter sua resistência aumentada pelo trabalho a frio. E as “ligas tratáveis” podem ainda apresentar aumento de resistência através de tratamento térmico, tanto que hoje algumas ligas podem ter resistência à tração de aproximadamente 700 MPa. O alumínio e suas ligas perdem parte de sua resistência a elevadas temperaturas, embora algumas ligas conservem boa resistência em temperaturas entre 200 °C e 260 °C. Em temperaturas abaixo de zero, entretanto, sua resistência aumenta sem perder a ductilidade e a tenacidade, tanto que o alumínio é um metal particularmente utilizado em aplicações a baixas temperaturas (ABAL, 2007).

1.2.2 Ligas de Alumínio

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 outros elementos de liga, formando a partir dessa combinação e ser possível obter características tecnológicas ajustadas de acordo com a aplicação do produto final. Naturalmente, uma só liga não pode combinar todas as propriedades ótimas para cada aplicação, sendo necessário conhecerem-se as vantagens e limitações de cada uma delas para que se possa fazer a melhor seleção.

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, etc (ABAL, 2007).

Descrever a função de cada elemento de liga é difícil porque esta se altera, não só com a quantidade dos elementos presentes na liga, mas, também, pela sua interação com outros elementos. Em geral, pode-se dividir os elementos entre aqueles que conferem à liga a sua característica principal (resistência mecânica, resistência à corrosão, fluidez no preenchimento de moldes, etc.), entre os que têm função acessória, como o controle de microestrutura e das impurezas e traços que prejudicam a fabricação ou a aplicação do produto, os quais devem ser controlados no seu teor máximo.

Dependendo do grupo de ligas, um determinado elemento químico tem função como adição ou é indesejável como impureza. Um exemplo disso é o chumbo, que é adicionado às ligas de usinagem por seu efeito “quebra-cavacos”, mas por ser um metal pesado sofre fortes restrições em produtos que entram em contato com alimentos. Na preparação de ligas, a partir da fusão de sucata e de retalhos de processo, atenção especial deve ser dada à separação e à classificação da matéria-prima para que sejam controladas as contaminações do banho metálico.

As ligas com base em alumínio não-ligado contêm entre 99,0% e 99,5% de alumínio, sendo o restante, principalmente, ferro e silício.

Pode-se obter metal com pureza maior do que 99,5% de alumínio, até 99,99%, a um custo muito mais elevado, que é usado quando se requer alta condutividade elétrica ou elevada resistência à corrosão (ABAL, 2007).

A composição química do alumínio e suas ligas são expressas em percentagem, obedecendo à Norma ABNT NBR 6834, que abrange o sistema de classificação e a densidade nominal das ligas trabalháveis de alumínio e o sistema de classificação das ligas de fundição e de alumínio primário em lingotes para refusão.

Nos próximos subitens serão apresentadas as duas categorias de classificação do alumínio e suas ligas, as trabalháveis e fundidas.

1.2.2.1 Ligas Trabalháveis

Nas ligas trabalháveis, as mais resistentes são as ligas da série alumínio-magnésio, disponíveis em vários formatos como lâminas, chapas, perfis, tubos, arames, etc. Elas também possuem elevada resistência à corrosão e são facilmente produzidas e soldadas.

As ligas tratadas termicamente de média resistência, que contêm magnésio e silício, possuem elevada resistência à corrosão, mas perdem um pouco da sua trabalhabilidade - o que é irrelevante em seções estruturais retas, as quais são muito difundidas em aplicações estruturais.

As ligas tratadas termicamente de elevada resistência, que contêm cobre ou zinco como principais elementos de liga, são tão resistentes quanto o aço estrutural, mas necessitam de proteção superficial.

Estas ligas são utilizadas quando a maior relação resistência/peso for a principal consideração, como na aviação (ABAL, 2007).

A tabela 2 a seguir resume as mais importantes ligas de alumínio trabalháveis.

Tabela 2: Principais ligas de alumínio trabalháveis

| Ligas | Características | Aplicações |
|------------------------------|---|---|
| 1050 1100 | Alumínio comercialmente puro, muito dúcteis no estado recozido, indicadas para deformação a frio | Equipamentos para indústria alimentícias, químicas, bebidas, trocadores de calor, utensílios domésticos |
| 2017 2024 2117 2219 | Ligas de AlCu, com elevada resistência mecânica, alta ductibilidade, média resistência à corrosão, boa usinabilidade | Peças usinadas e forjadas, indústria aeronáutica, transporte, máquinas e equipamentos |
| 3003 3105 | Ligas de AlMn, com boa resistência à corrosão, boa conformabilidade e moderada resistência mecânica. São ligas de uso geral | Carrocerias de ônibus e de furgões, equipamentos rodoviários e veículos em geral, reboques, vagões, utensílios domésticos, equipamentos para indústria química e alimentícia, telhas, etc |
| 4043 4047 | Ligas de AlSi utilizadas em varetas de solda | Soldagem das ligas das séries 1XXX, 3XXX e 6XXX |
| 5005 5052 5056 | Ligas de AlMg são dúcteis no estado recozido, mas endurecem rapidamente sob trabalho a frio. Alta resistência à corrosão em ambientes marítimos. Em geral a resistência mecânica aumenta com os teores crescentes de Mg | Carrocerias de ônibus e de furgões, equipamentos rodoviários e veículos em geral, reboques, vagões, utensílios domésticos, equipamentos para indústria química e alimentícia, telhas, etc |
| 6053 6061 6063 6351 | Ligas de AlMgSi, tratáveis termicamente com excelente resistência mecânica na têmpera T6 | Carrocerias de ônibus e de furgões, equipamentos rodoviários e veículos em geral, reboques, vagões, utensílios domésticos, equipamentos para indústria química e alimentícia, telhas, etc |

| | | |
|--------------|--|--|
| 7075 7178 | Ligas de AlZn, tratáveis termicamente, alta resistência mecânica, boa resistência à corrosão, boa conformabilidade | Peças sujeitas aos mais elevados esforços mecânicos em indústria aeronáutica, militar, máquinas e equipamentos, moldes para injeção de polímero e estruturas |
|--------------|--|--|

Fonte: ABAL, 2007

1.2.2.2 Ligas Fundidas

Diferentemente dos materiais trabalháveis, os quais estão sujeitos às variações 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.

O alumínio pode ser combinado com diversos metais a fim de melhorar suas características mecânicas e estruturais, como silício melhora fluidez, cobre maiores dureza, magnésio melhora resistência e ductibilidade (ABAL, 2007).

A tabela 3 resume as mais importantes ligas de alumínio utilizadas em fundição.

Tabela 3: Principais ligas de alumínio utilizadas em fundição

| Ligas | Características | Aplicações |
|-------|--|---|
| 150.0 | Alumínio comercialmente puro com excelente resistência à corrosão e boa condutividade elétrica, não tratável termicamente. Fundição em molde permanente, areia e sob pressão | Acessórios utilizados nas indústrias químicas e alimentação, rotores, condutores elétricos e equipamentos industriais |
| 242.0 | Excelentes propriedades mecânicas em temperaturas elevadas e muito boa usinabilidade. Baixa resistência à corrosão. Fundição em moldes permanente e areia | Pistões e cabeçotes para aviões, motores a diesel e de motocicletas |
| 295.0 | Média resistência, boa usinabilidade. Baixa resistência à corrosão. Fundição em areia | Elementos estruturais de máquinas, equipamentos e aviação, cárter, rodas de ônibus e de aviões |
| 319.0 | Resistência mecânica moderada e boas características de fundição e usinagem. Fundição em molde permanente e em areia | Uso geral, além de revestimento e caixas de equipamentos elétricos |

| | | |
|-------|--|---|
| 355.0 | Média resistência mecânica, com excelente fluidez, boa usinabilidade após tratamento térmico, boa estanqueidade sob pressão. Fundição em molde permanente e areia | Peças complexas ou sob tensão, cabeçote de cilindros, corpo de válvulas, camisas de água, união para mangueiras e acessórios para indústria de máquinas e na construção civil |
| 357 | Elevada resistência mecânica, excelente fluidez e resistência à corrosão. Fundição em molde permanente e areia | Peças sob tensão que exigem relação de peso com elevadas propriedades mecânicas e de resistência à corrosão, tais como, componentes de aviação e de mísseis |
| 360.0 | Excelente estanqueidade sob pressão e resistência à corrosão e muito boa usinabilidade. Fundição sob pressão | Recipientes e componentes de iluminação, peças externas de motores e utensílios domésticos |
| 380.0 | Bom acabamento superficial, muito boa usinabilidade, podendo ser anodizado. Fundição sob pressão | Peças de utensílios domésticos em geral |
| 413.0 | Excelente estanqueidade sob pressão e resistência à corrosão e baixa usinabilidade. Fundição sob pressão | Caixas de medidores de energia elétrica, peças externas de motores, peças fundidas com seções finas que requerem boa resistência à corrosão |
| 520.0 | Excelente resistência mecânica, inclusive sob cargas de impacto, boas condições de anodização e de polimento, baixa fluidez, excelente usinabilidade e resistência à corrosão, mas susceptível à corrosão sob tensão em temperaturas acima de 120°C. Fundição em areia | Peças submetidas a elevadas tensões na engenharia de aviação, marítima e de transporte |
| 712.0 | Boas propriedades mecânicas envelhece naturalmente e se retempera após soldagem, excelente usinabilidade e boa resistência à corrosão. Fundição em areia | Peças fundidas para conjuntos de brasagem |

Fonte: Adaptado de ABAL, 2007

No presente estudo será analisada a possibilidade de substituição do alumínio SAE 305, ou seja, equivale ao *Aluminium Association* (AA) 413.0 manufaturado em processo de fundição sob pressão, conforme característica e aplicações da tabela 3.

A seguir será apresentada as propriedades do alumínio SAE 305.

- **Nomes comerciais:**

Designação anterior: 413.0:13. A413.0:A13

- **Especificações:**

Antigo ASTM: 413.0: S12B. B85 S12A

SAE: A413.0:J453, 305

Numero UNS: 413.0: A04130. A413.0: A14130

Governo: A413.0: QQ-A-591 (classe 2)

Estrangeiro. Canadá: A413.0, CSA S12P. França: NF A-S13. ISO: AlSi12

- **Composição Química:**

Na tabela 4 estão mostradas as propriedades químicas da liga 413/ 305.

Tabela 4: Propriedade química liga 413/ 305

| Liga | Cu | Mg | Mn | Si | Fe | Ni | Zn | Sn | Outros |
|--------|---------|-------------|-------------|----------------|------------|------------|------------|-------------|-------------|
| 413.0 | 1,0 max | 0,10 max | 0,35 max | 11,0 - 13,0 | 2,0 max | 0,5 max | 0,5 max | 0,15 max | 0,25 max |
| A413.0 | 1,0 max | 0,10 max | 0,35 max | 11,0 - 13,0 | 1,3 max | 0,5 max | 0,5 max | 0,15 max | 0,25 max |

Fonte: ASM Handbook vol.2, 1990

- **Propriedades mecânicas e físicas:**

A tabela 5 apresenta as propriedades mecânicas e físicas da liga 413/ 305.

Tabela 5: Propriedade mecânica e física liga 413

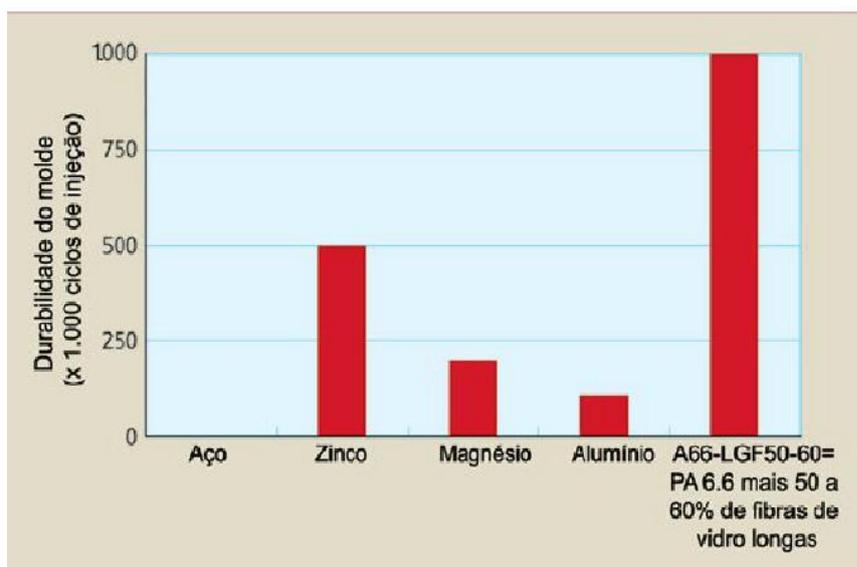
| Propriedades | Valor |
|------------------------------|------------------------------------|
| Resis. Tração | 290 - 300 MPa |
| Limite Escoamento | 130 - 145 Mpa |
| Alongamento | 2,5 - 3,5% |
| Resis. Ruptura/ Cisalhamento | 170 Mpa |
| Resist. Fadiga | 130 Mpa à 5x10 ⁸ ciclos |
| Coef. Poisson | 0,33 |
| Massa especifica | 2,657 g/cm ³ |
| Calor específico | 963 J/Kg.K |
| Calor Latente de fusão | 389 kJ/Kg |
| Condutividade térmica | 121 W/m.K |
| Resistividade elétrica | 55,6nΩ.m à 20°C |
| Temperatura Fusão | 650 - 760°C |
| Temperatura de fundição | 635 - 705°C |
| Coef. Expansão térmica | 20,4 μm/m.K |

Fonte: ASM Handbook vol.2, 1990

Na fundição com matriz, o metal líquido é forçado para o interior de um molde sob pressão e a uma velocidade relativamente elevada, e a solidificação ocorre enquanto a pressão é mantida. Quando a solidificação total é atingida, as partes da matriz são abertas e a peça fundida é ejetada. Entretanto, essa técnica se presta apenas para peças relativamente pequenas e para ligas de zinco, alumínio e magnésio, que possuem baixas temperaturas de fusão (CALLISTER JR., 2007).

Peças com melhor acabamento superficial e grande precisão de detalhes são produzidas neste processo. Este processo torna-se econômico para um número considerável de peças (ABAL, 2007).

Contudo, em comparação com a moldagem por injeção de resinas, a curta vida útil do molde de fundição (Gráfico 1) e as operações adicionais de acabamento que normalmente são requeridas podem ser consideradas como sendo desvantagens.



Gráficos 1: Comparação da vida útil de moldes usados em injeção sob pressão de ligas metálicas versus injeção de polímero

Fonte: REVISTA POLÍMERO INDUSTRIAL, março 2012-09-11

1.3 POLÍMEROS

A palavra polímero se origina do grego poli (muitos) e mero (unidade de repetição). Assim, um polímero é uma macromolécula composta por muitas (dezenas de milhares) unidades de repetição denominadas meros, ligadas entre si por ligação covalente (CANEVAROLO JR. 2006). Na grande maioria dos polímeros industrializados,

o massa molar se encontra entre 10^4 e 10^6 Kg/mol, muitos deles são considerados polímeros de engenharia (MANO E MENDES, 1999).

O conceito de polímero de engenharia se aplica a todos os polímeros que podem ser usados em substituição aos materiais tradicionais de engenharia (MANO, 1996). As propriedades mecânicas, térmicas, elétricas, óticas e outras, como densidade, são comparadas entre os materiais para avaliar a troca, visando a uma melhor desempenho, por exemplo, como design, maior resistência ao impacto, melhor resistência às intempéries, fácil processamento e até menor peso.

Segundo Hemais (2003), a indústria automobilística vem fazendo gradativamente a substituição dos materiais tradicionais por polímero no decorrer de vários anos. Notoriamente observou-se que somente nas duas últimas décadas é que o ritmo dessas mudanças vem acelerando gradativamente.

1.3.1 Classificação dos Polímeros

Os polímeros podem ser classificados em dois grandes grupos quanto à aplicação geral e de engenharia, conforme é mostrado na tabela 6. Por sua vez os polímeros de uso geral são subdivididos em termopolímeros e termorrígidos, conforme suas características de fusibilidade, ou seja, o primeiro pode ser fundido e resfriado várias vezes, enquanto que o termorrígido após o primeiro aquecimento torna-se infusível. Os polímeros de engenharia podem ser de uso geral ou especial, cuja fusibilidade permite fácil processamento.

Os polímeros podem ser classificados quanto ao comportamento mecânico em: polímeros, elastômeros e fibras.

- a) Polímeros: um material polimérico sólido na temperatura ambiente, podendo ser termopolímero ou termorrígido.

Os termopolímeros são polímeros que sob o efeito da temperatura e pressão, amolecem e fluem, podendo ser moldados sob estas condições. Depois de retirada à solicitação de temperatura e pressão, os mesmos se solidificam, adquirindo a forma do molde. Novas aplicações de temperatura e pressão reiniciam o processo, portanto são recicláveis. Além disto, os mesmos são solúveis e possuem cadeia linear ou ramificada. Temos como exemplos destes: PE, PP e PVC (CANEVAROLO JR, 2006).

Os termorrígidos, também conhecidos como termofixos, são polímeros que quando sujeitos a aplicação de temperatura e pressão, amolecem e fluem adquirindo a forma do molde. Eles também reagem quimicamente formando ligações cruzadas entre as cadeias e se solidificando. Posteriormente novas aplicações de temperatura e pressão não têm mais influência, tornando materiais insolúveis e não recicláveis. Com isto, os termorrígidos são moldados quando ainda na forma de pré-polímero, pois ainda não possuem as ligações cruzadas. Temos como exemplo destes o baquelite e o epóxi.

Tabela 6: Classificação dos Polímeros

| Aplicação | Grupo | Principais polímeros | Sigla |
|------------------|------------------------------------|--|---|
| Geral | Termopolímeros | Polietileno de alta e baixa densidade Polipropileno Poliestireno Poliestireno de alto impacto Poli(metacrilato de metila) | PEAD e PEBD PP OS HPS PMMA |
| | Termorrígidos | Resina epoxidíca Resina poliéster Resina de fenol-formaldeído Poliuretanos* | ER PETINS PR PU |
| Engenharia | Uso geral | Polietileno de altíssima massa molar Polipropileno Poli(óxido de metileno) Poli(tereftalato de etileno) Policarbonato Poliamida alifática | UHMWPE PP POM PET PC PA |
| | Uso especial ou de alto desempenho | Poli(tetraflúor-etileno) Poliésteres líquido-cristalino Poliâmidas aromáticas Poli(éter-éter-cetona) Poli(aril-sulfona) Poliftalamida | PTFE LCP PA PEEK PAS PPA |

* Os poliuretanos podem ser termorrígidos e termopolímeros.

Fonte: GASPARIN, 2004

b) Elastômero: é um material polimérico que na temperatura ambiente pode deformar-se no mínimo duas vezes o seu comprimento inicial, retornando ao comprimento original logo após a retirada do esforço. Para apresentar estas características, os elastômeros normalmente possuem cadeias flexíveis amarradas umas às outras, com uma baixa densidade de ligação cruzada. Um exemplo de elastômero é a borracha vulcanizada, termo genérico usado para

qualquer elastômero ou mistura dos mesmos após a formação de ligações cruzadas.

- c) Fibras: é um termopolímero orientado. A orientação das cadeias e dos cristais, feita de modo forçado durante a fiação, aumenta a resistência mecânica desta classe de materiais, os tornando possíveis de serem usados na forma de fios finos. Tem-se como exemplo dos mesmos o nylon e o poliéster (CANEVAROLO JR, 2006).

Na figura 5 é mostrada a curva de tensão deformação ilustrativa para os diferentes tipos de comportamento mecânico dos polímeros.

Assim, de uma forma geral, os materiais poliméricos podem ser classificados em três grandes grupos: polímeros para usos gerais (*commodities*), polímeros para usos específicos (*quasi-commodities*) e polímeros de alto desempenho (*especialidades*).

Polímeros tipo *commodities* ou convencionais são aqueles produzidos em grande escala, têm baixo valor agregado, não apresentam diferenciação, são utilizados para finalidades gerais e são consumidos em grandes quantidades. São exemplos as poliolefinas, o poliestireno e o PVC.

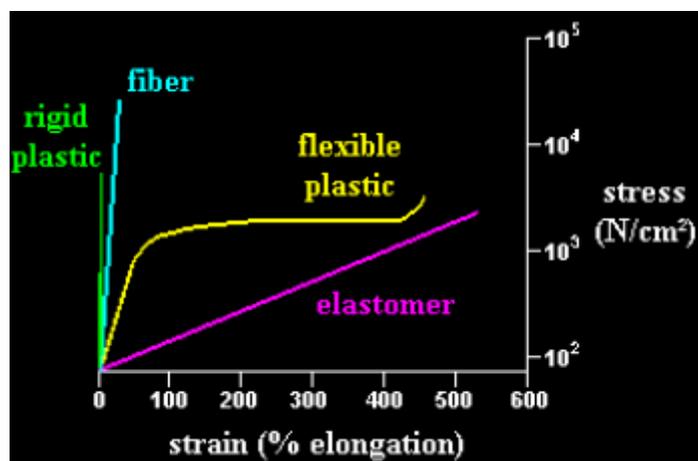


Figura 5: Curva tensão x deformação do comportamento mecânico dos polímeros

Fonte: ZIMMERMANN, 2011

Os chamados polímeros *quasi-commodities* ou especiais são, também, produzidos em grande escala, porém em nível mais baixo do que as *commodities*. Entretanto, *quasi-commodities* apresentam desempenhos diferenciados e propriedades que os fazem ser ideais para determinadas aplicações. Nesta classe incluem-se os copolímeros de etileno-acetato de vinila e os homopolímeros de politetrafluoro-etileno.

Polímeros de *especialidades* ou de engenharia são aqueles que apresentam alto desempenho, são produtos específicos, com propriedades bem definidas e incomuns, tem alto valor agregado e são produzidos em escalas de pequeno porte. Tem-se como exemplo: as Poliamidas, poliésteres termopolímeros como PET e outros como o policarbonato (HEMAIS, 2003).

A Figura 6 é a representação gráfica desta classificação geral proposta. Verifica-se que quanto maior o volume de produção, maior é o consumo e menor é o grau de diferenciação, o preço e o conteúdo tecnológico. Por exemplo, os polímeros classificados no topo do triângulo (especialidades) são os que apresentam maior preço, diferenciação e conteúdo tecnológico, porém são produzidos e consumidos em menor escala e têm disponibilidade limitada a poucos produtores mundiais (HEMAIS, 2003).

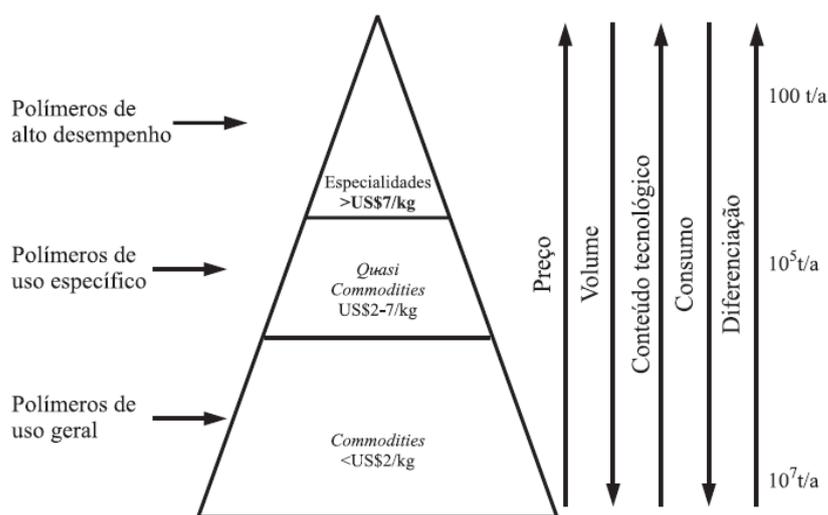


Figura 6: Classificação dos polímeros
Fonte: HEMAIS, 2003

De acordo com Hemaís (2003), essa classificação representa uma visão centrada no produto, não incorporando a tendência de inovação dos polímeros existentes a partir das décadas de 1980. O polímero é visto mais como um conjunto de características de partida do que como uma busca de melhores respostas às limitações de preços e desempenho.

1.3.2 Propriedades mecânicas dos polímeros

Nos polímeros muitos aspectos necessitam ser observados, mas provavelmente o mais importante é que ao contrário do que ocorre com os metais as propriedades mecânicas dos polímeros são dependentes do tempo. Além disto, os efeitos do nível de tensão, a temperatura do material, e a estrutura (como o massa molar, a orientação das moléculas e a densidade), também têm influência.

Como exemplo disso o polipropileno, com o aumento da temperatura de 20 °C para 60 °C pode causar um decréscimo de até 50% na tensão que o material suporta.

Devido a estas variações, certas propriedades como o módulo de elasticidade, só pode ser usado como padrão de referência e para a condição que foi levantado, necessitando de outras avaliações se o material for usado em condições diferentes das mesmas (CHANDA, 1987).

1.3.2.1 Relação tensão-deformação

O comportamento da tensão e deformação nos polímeros com uma taxa constante de carga aplicada tem um papel importante no controle de qualidade e como comparativo para vários polímeros. Os polímeros possuem comportamento similar na tração e no cisalhamento, porém a magnitude e a extensão para cada curva são diferentes. Na Figura 7 é possível visualizar um diagrama tensão-deformação típica para termopolímeros em geral. O diagrama pode sofrer variações dependendo das propriedades do polímero. Devido a esta variação, os valores obtidos para as tensões são diferentes, produzindo como consequência uma curva diferente.

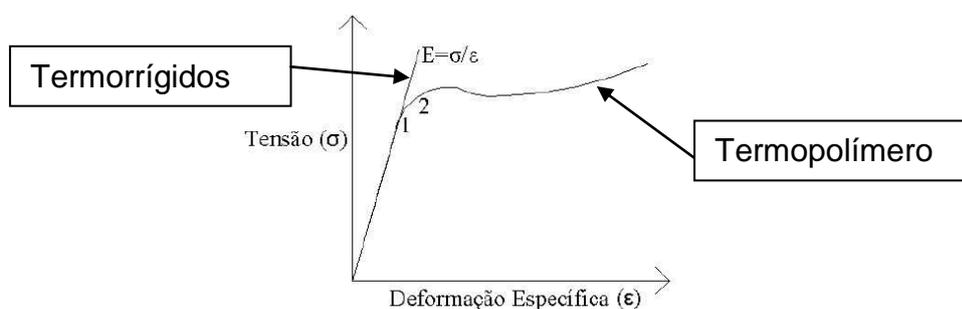


Figura 7: Diagrama tensão x deformação para termopolímeros e termorrígidos

Fonte: CHANDA, 1987

A tensão de ruptura, deformação específica e o módulo de elasticidade, podem ser obtidos pelo estudo da relação tensão-deformação como ocorre para os metais, através da relação:

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \quad (1)$$

Em que:

σ = Tensão; E = Módulo elasticidade ε = Deformação

Para a determinação do módulo de elasticidade leva-se em conta a tensão suportada pelo material dividida pela deformação sofrida pelo mesmo em um determinado ponto da deformação elástica. Outra forma para se determinar o módulo de elasticidade é através da medida da inclinação tangente da curva.

Na deformação mostrada no diagrama tensão deformação específica (Figura 7), o material se comporta como um material linear-elástico até o ponto 1, e a deformação sofrida é recuperada logo após a retirada da carga. Esta deformação é pequena e é associada com os movimentos das ligações interatômicas entre os átomos das moléculas do polímero. Este tipo de deformação é recuperado instantaneamente após a retirada da carga, não ficando nenhuma deformação permanente nas moléculas.

Entre os pontos 1 e 2 do diagrama, a deformação é associada com o movimento parcial das cadeias moleculares do material, quando carregado com uma carga. Isto pode ocorrer sem o escorregamento intermolecular. A deformação é recuperada, porém não instantaneamente. Embora esta ocorra com a ultrapassagem do limite de proporcionalidade, não há uma deformação permanente com a modificação dos arranjos intermoleculares. Este tipo de deformação é caracterizado pela recuperação e pela não linearidade e é muito comum no estado elástico.

Após o ponto 2, o limite de elasticidade do material é ultrapassado ocorrendo o deslocamento das moléculas umas em relação às outras, produzindo uma deformação de característica permanente e irreversível.

Para determinação da tensão limite de escoamento dois métodos são utilizados. No primeiro, se considera a tensão de escoamento arbitrariamente como sendo 0,02 do campo de deformação específica (SQUENAL, 2002).

No segundo método a tensão de escoamento pode ser definida pela razão da tensão total pela deformação total sendo um valor de aproximadamente 50% ou 70% do módulo de elasticidade (CHANDA, 1987).

O coeficiente de Poisson (número adimensional) para os materiais poliméricos é determinado pela redução da seção horizontal sendo a razão entre a deformação transversal (contração) sofrida pelo corpo de prova, pela deformação longitudinal (elongação). O coeficiente de Poisson para a maioria dos polímeros frágeis é de aproximadamente 0,3; para polímeros mais flexíveis é aproximadamente 0,45. O coeficiente varia não só com a natureza do material, mas também com a magnitude da deformação aplicada ao material.

O diagrama tensão deformação específica serve como uma referência para as propriedades mecânicas dos polímeros como em outros materiais, sendo de forma geral assim: materiais resistentes têm tensão de ruptura maior que materiais frágeis; materiais duros têm maiores módulos de elasticidade que materiais moles; materiais tenazes suportam maiores deformações com maior carga por unidade de volume (CHANDA, 1987).

1.3.2.2 Comportamento viscoelástico

Nos polímeros sob deformações relativamente pequenas, o comportamento mecânico em temperaturas baixas pode ser elástico, ou seja, de acordo com a lei de Hooke, (Equação 1). Sob temperaturas mais elevadas, prevalece um comportamento viscoso ou semelhante ao de um líquido, Em temperaturas intermediárias, o polímero é um sólido com as características de uma borracha, que exibe características mecânicas que são uma combinação desses dois extremos, sendo denominada viscoelasticidade (CALLISTER JR, 2008).

A maioria das características de materiais viscoelásticos é a de exibir deformação dependente do tempo, quando sujeitos a cargas constantes que é o caso da fluência. Os materiais viscoelásticos também possuem a capacidade de se reconstituírem quando a tensão suportada pelo mesmo é removida, fazendo com que ocorra uma reconstituição do material (CHANDA, 1987).

1.3.2.3 Fluência

Fluência (*Creep*) é a deformação do material durante o tempo devido à aplicação de uma tensão contínua. Materiais poliméricos apresentam deformação por fluência, sendo esta afetada por três fatores: tensão, tempo e temperatura (ZIMMERMANN, 2011).

Polímeros e borrachas geralmente são bastante suscetíveis ao surgimento de fluência a temperaturas baixas. Nos testes de fluência uma carga ou tensão é aplicada ao material e a variação do deslocamento ou deformação é observada.

Na figura 8 é possível observar este comportamento.

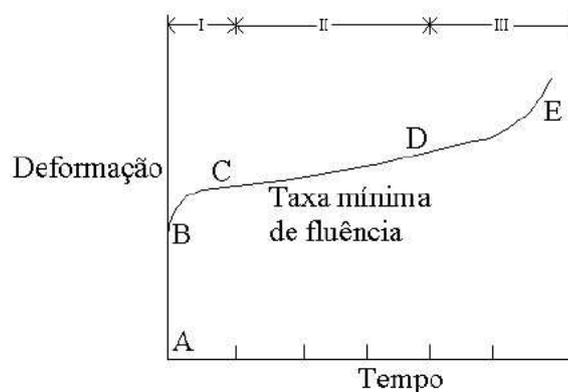


Figura 8: Curva de fluência para os polímeros

Fonte: CHANDA, 1987

É possível visualizar (Figura 8) que existe quase que instantaneamente uma deformação elástica seguindo uma dependência com o tempo, que ocorre em três estágios: primeiramente uma fluência transiente BC, logo após um estado constante de fluência CD e finalmente um estágio final de aumento acelerado do mecanismo de fluência.

Os polímeros de maneira geral possuem altas taxas de fluência a baixas tensões e temperaturas, conforme foi comentado no início deste item. A fluência varia de um polímero para o outro, possuindo os termorrígidos uma resistência bem maior a fluência que os termopolímeros. É importante ressaltar que o material não pode se deformar de forma contínua e em algum momento vai ocorrer à fratura, que devido à fluência é chamada de fratura de fluência (CHANDA, 1987).

1.3.2.4 Fratura

A principal causa de fratura nos polímeros é por ação prolongada e constante de tensões levando à fluência. Dois tipos de fraturas podem ser observados; a fratura frágil e a fratura dúctil. A fratura frágil é potencialmente mais perigosa que a fratura dúctil, pois a mesma ocorre sem a observância de deformação no material. Na fratura dúctil, grandes deformações não recuperáveis ocorrem antes da ruptura real, servindo de alerta para que o que o material esteja perdendo suas características.

O material absorve maior energia quando a fratura é dúctil do que frágil. Nos materiais poliméricos os dois tipos de fratura podem ser observados dependendo de variáveis como: taxa de deformação, tensões aplicadas, temperatura e condições de operação (CHANDA, 1987).

1.3.2.5 Efeito da temperatura

A temperatura possui forte efeito sobre a deformação nos polímeros. O efeito da temperatura para diferentes materiais poliméricos depende da estrutura de cada material e principalmente se o mesmo é amorfo¹ ou cristalino². Se o polímero é praticamente em grande parte amorfo, é a temperatura de transição vítrea que vai determinar a máxima temperatura de serviço. Caso o material seja em sua maior parte cristalino como o polipropileno e o polietileno, a temperatura de transição vítrea³ (TG) é menos importante devido a ter uma menor região amorfa. Para estes materiais a temperatura de amolecimento é a temperatura limite de serviço do material (CHANDA, 1987).

¹Amorfo - são materiais que não possuem ordem estrutural nas cadeias.

²Cristalino - são materiais caracterizados pela capacidade das moléculas formarem arranjos ordenados a longo alcance.

³Temperatura transição vítrea (TG) - temperatura abaixo da qual a cadeia principal do polímero não possui mobilidade (ZIMMERMANN, 2011).

1.3.2.6 Resistência ao impacto

A resistência ao impacto permite que seja possível determinar a transição dúctil-frágil nos materiais, sendo também usada em polímeros. A propriedade que tem maior influência nesta transição é a temperatura, sendo que à medida que a temperatura é reduzida esta transição se torna mais significativa.

O estudo do comportamento sob impacto de materiais poliméricos é de enorme importância, visto o grande número de aplicações práticas sujeitas a solicitações dessa ordem, tais como: choques mecânicos em quedas, batidas, etc. Dessa forma, a resistência ao impacto é frequentemente utilizada como um fator de decisão na seleção de materiais. Muitos polímeros considerados satisfatórios em algumas situações são rejeitados em outras por apresentarem tendência à fratura frágil sob impacto. Esses materiais, que normalmente podem ser considerados dúcteis em testes onde a taxa de deformação é baixa ou moderada, quando em um agente concentrador de tensão, devido a defeitos ou ao próprio design da peça, apresentam fratura frágil (CANEVAROLO JR. 2006).

Variações no ângulo da ponta do entalhe permitem caracterizar quanto o polímero é sensível ao entalhe (trinca). A Figura 9 ilustra como varia a resistência ao impacto com o raio da ponta do entalhe para vários termopolímeros. Observa-se que o PVC e o Nylon são mais sensíveis ao entalhe que o acrílico e o copolímero de ABS.

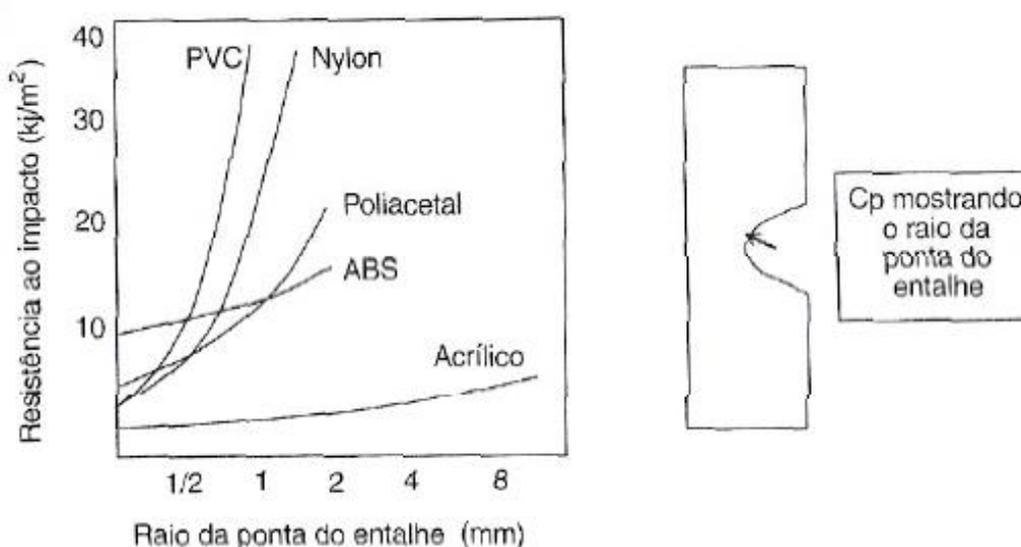


Figura 9: Influência do raio da ponta do entalhe na resistência ao impacto de alguns termopolímeros

Fonte: ZIMMERMANN, 2011

1.3.2.7 Fadiga

Um material, sujeito a tensões alternadas sobre longos períodos de tempo, pode fraturar a tensões muito abaixo da tensão limite de ruptura quando sujeito a cargas estáticas, devido ao fenômeno chamado de fadiga. Nos polímeros a fadiga tem um papel importante nas causas de fraturas, porém, é menos importante do que nos metais, sendo necessário um estudo específico de mecânica da fratura em polímeros, para maiores conclusões (CHANDA, 1987).

1.3.2.8 Dureza

Existem diferentes métodos para determinar a dureza em materiais poliméricos. Os mais comumente utilizados se baseiam na resistência do material a sofrer uma marca quando o mesmo é submetido a uma ponta de um material duro como o diamante. Com o tamanho da marca efetuada por esta ponta é possível, através de dados de escala, se obter a dureza do material.

Para os polímeros o método mais utilizado é o de dureza Rockwell R e Shore (CALLISTER, 2007).

1.3.3 Poliamida 6 e Poliamida 6.6

Dentre os polímeros de engenharia, as Poliamidas (PA) se destacam, pois se caracterizam por ótimas propriedades mecânicas, e outras qualidades, como: resistência ao tempo, baixo coeficiente de atrito, alta temperatura de fusão, boa resistência ao impacto e alta resistência à fadiga. Elas também possuem uma ótima resistência aos solventes orgânicos, exceto a alguns como o ácido fórmico e m-cresol, por exemplo.

O consumo anual desse material na América do Sul, principalmente a de PA 6 e PA 6.6, chega a 30.000 t/ano, sendo o Brasil responsável pelo consumo de 24.000 t/ano. Nesta estimativa não são considerados os consumos destinados à produção de fios

têxteis e de carpetes, que elevam essas cifras enormemente (WIEBECK E HARADA, 2005).

Como exemplo de novas aplicações para as Poliamidas, pode-se citar os coletores de admissão de gases e a tampa de válvulas para motores de veículos. Em ambos os casos, a PA 6.6 substitui o metal com vantagens, pois é mais leve, dispensa trabalhos de usinagem ou rebarbação, confere ao interior do coletor uma superfície com índice inferior de rugosidade, reduzindo a perda de carga no fluxo de ar e resultando em alta produtividade na injeção das peças.

O desenvolvimento inicial das Poliamidas, ou nome comercial chamadas de náilon – derivado do inglês *nylon* – se deve principalmente ao trabalho de W. H. Carothers e seus colaboradores nos Estados Unidos, que sintetizaram a primeira Poliamida náilon 6.6 em 1935, a partir da policondensação de hexametileno diamina com ácido atípico (WIEBECK E HARADA, 2005).

As resinas de Poliamida apresentam várias propriedades que as colocam, no campo da aplicação, como um dos materiais mais nobres, técnicos e versáteis. Todas as Poliamidas são higroscópicas.

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 águas pelas Poliamidas, devido à natureza higroscópica das ligações de hidrogênio que se transformam em hidroxilas. Quando se altera a concentração de água nas peças de Poliamida modifica-se também suas propriedades mecânicas e dimensionais.

As principais diferenças nas propriedades das Poliamidas de interesse comercial são apresentadas na Tabela 7 a seguir.

Tabela 7: Propriedades das Poliamidas

| Propriedades | PA 6 | PA 11 | PA 12 | PA 6.6 | PA 6.10 | PA 6.12 |
|---|-------------|--------------|--------------|---------------|----------------|----------------|
| Temperatura de fusão (°C) | 215 | 185 | 177 | 252 | 215 | 210 |
| Densidade (g/cm ³) | 1,14 | 1,04 | 1,02 | 1,15 | 1,08 | 1,07 |
| Resistência à Tração (MPa) | 83 | 55 | 52 | 83 | 62 | 59 |
| Módulo de flexão (MPa) | 2758 | 1241 | 1172 | 2826 | 2413 | 1999 |
| Absorção de água (%) em 24 horas de imersão | 1,7 | 0,3 | 0,25 | 1,5 | 0,5 | 0,4 |

Fonte: WIEBECK E HARADA, 2005.

De acordo com a tabela 8, propriedades do náilon 6.6 são levemente superiores às do náilon 6 quanto à resistência térmica e absorção de água. No entanto, o náilon 6 apresenta vantagens de melhor facilidade de processamento, devido a sua temperatura de fusão inferior e ao fato de acrescentar menor encolhimento pós-moldagem.

Uma das principais características nos náilons está em sua excelente resistência à abrasão e por ser autolubrificante, principalmente em moldado com alto grau de cristalinidade, o que induz alta dureza superficial.

Tabela 8: Comparação das propriedades do PA 6 x Pa 6.6

| Propriedades | PA 6 | PA 6 30FV | PA 6 30MEV | PA 6 30CM | PA6.6 | PA 6.6 30FV | PA 6.6 30MEV | PA 6.6 30CM |
|--------------------------------|-------------|----------------------|-----------------------|----------------------|--------------|------------------------|-------------------------|------------------------|
| Temp. de Fusão(°C) | 220 | 220 | 220 | 220 | 260 | 260 | 260 | 260 |
| Densidade (g/cm ³) | 1,14 | 1,35 | 1,38 | 1,38 | 1,14 | 1,35 | 1,38 | 1,38 |
| Resist. tração (MPa) | 65 a 80 | 150 | 65 a 80 | 65 a 80 | 80 a 90 | 170 | 70 a 75 | 70 a 75 |
| Mod. flexão (MPa) | 2800 | 9000 | 6 a 7000 | 5500 | 2800 | 8900 | 6 a 7000 | 6 a 7000 |

FV = Fibra de vidro

MEV = microsfera de vidro

CM = carga mineral

Fonte: WIEBECK E HARADA, 2005.

Uma das características das Poliamidas está na sua temperatura de fusão. A Tabela 9, aparecem, de maneira geral, as temperaturas limites de trabalho das Poliamidas 6 e 6.6.

Tabela 9: Temperaturas limites de trabalho das Poliamidas 6 e 6.6

| Poliamida | Trabalho contínuo (°C) | Trabalho esporádico (°C) | Temperatura Fusão(°C) |
|------------------|-------------------------------|---------------------------------|------------------------------|
| PA 6.6 | 80 a 100 | 150 a 170 | 255 a 260 |
| PA 6 | 80 a 100 | 140 a 160 | 217 a 223 |

Fonte: WIEBECK E HARADA, 2005

Em temperaturas que excedam 70 a 80 °C, a superfície do produto pode tornar-se amarelada, devido a oxidação. Em geral, sob condições de temperatura de trabalho, a variação de cor possui apenas um efeito superficial, não provocando mudanças significativas nas propriedades do produto acabado, especialmente se a espessura não for particularmente pequena (WIEBECK E HARADA, 2005).

1.3.4 Poliacetal (POM)

Poliacetais ou polioximetileno (POM) são polímeros derivados do formaldeído ou do trioxano. Além dos homopolímeros, existem também os copolímeros, que normalmente utilizam pequenas percentagem de óxido de etileno como comonômeros. Os policetais possuem propriedades características dos polímeros semicristalinos de alta massa molar. Os tipos comuns possuem cristalinidade em torno de 75% com temperatura de fusão de 170°C. Sua absorção de água é quase desprezível e são insolúveis nos solventes comuns à temperatura ambiente. Podem ser processados pelos métodos usuais de injeção e extrusão.

A maior utilização das resinas acetálicas é na substituição dos metais. Sua rigidez, baixo peso, estabilidade dimensional e resistência à corrosão, ao desgaste e abrasão, permitem substituir o bronze, ferro fundido e zinco em muitos casos. Aplicações típicas incluem peças automobilísticas, tais como o mecanismo de abertura do vidro da porta, carcaças de bombas, engrenagens e tubos (especialmente para os sistemas de óleos) (WIEBECK E HARADA, 2005).

O homo e o copolímero acetal possuem propriedades muito semelhantes entre si e de grande analogia com as do náilon. Os poliacetais são vantajosos quanto à resistência à fadiga, fluência, rigidez e resistência à água. As Poliamidas em ambientes secos são superiores em tenacidade ao impacto e resistência à abrasão. A Tabela 10 apresenta as propriedades mecânicas e físicas dos poliacetais.

Tabela 10: Propriedades mecânicas e físicas dos poliacetais

| Propriedades | Método | Unid | Acetal Homo | Acetal Copo | Homo +20% FV | Copo +25% FV |
|--------------------------|-----------|-------------------|----------------|----------------|-----------------|-----------------|
| Resist. Tração na ruptur | ASTM D638 | MPa | 70 | 60 | 60 | 120 |
| Alongamento na ruptura | ASTM D638 | % | 40 | 70 | 12 | 3 |
| Módulo de flexão | ASTM D790 | GPa | 2,8 | 2,6 | 5,0 | 7,7 |
| Resist. impacto Izod | ASTM D256 | J/m | 75 | 65 | 43 | 60 |
| Dureza Rockwell | ASTM D785 | R | 120 | 115 | 118 | 110 |
| Densidade | ASTM D792 | g/cm ³ | 1,42 | 1,41 | 1,56 | 1,59 |
| Absorção umidade 24h | ASTM D570 | % | 0,25 | 0,22 | 0,25 | 0,29 |

Fonte: WIEBECK E HARADA, 2005

A temperatura de fusão do acetal homopolímero não é das mais elevadas. Porém, sua temperatura de distorção térmica a 1,82 e 0,46 MPa é mais alta que muitos outros polímeros. Sua temperatura máxima de uso contínuo é de 85°C. Para o copolímero essa temperatura sobe para 105°C, enquanto o uso intermitente permite até 135°C (WIEBECK E HARADA, 2005).

1.3.5 Poliftalamida PPA

O Poliftalamida (PPA) é um polímero de alto desempenho semicristalino, relativamente novo, que oferece melhor desempenho quando comparado a outros polímeros tradicionais como policarbonato, poliamidas, poliésteres e acetais, e tem ainda mais baixo custo do que polímeros especiais como PEEK (poliéteretercetona) e LCP (polímero de cristal líquido). Apresenta entre outras características, excelente resistência a impacto, ótima atuação em altas temperaturas, porém, não retarda propagação de chama (WIEBECK E HARADA, 2005).

As características da poliftalamida são:

- Temperatura de transição vítrea (T_g): 127°C (superior às Poliamidas que é de 60°C);
- Temperatura de transição cristalina (T_m): 310°C (também superior às Poliamidas);
- Resistência à tensão na tração: 62 a 232 MPa;
- Módulo de Flexão: 1,9 a 19 GPa.

Principais propriedades do PPA:

- Excelentes propriedades mecânicas como resistência à tração, flexão, dureza e resistência à fadiga (23°C a 60 Hz);
- Alta resistência térmica;
- Boa estabilidade dimensional e processabilidade;
- Não requer secagem crítica e pode ser empregado facilmente para produção complicada, usando equipamentos de moldagem convencional;
- Inerentemente não retardam chama;
- Bom comportamento em ambientes úmidos;

- Boa resistência química a hidrocarbonetos alifáticos, aromáticos e clorados e também a óleos, graxas, cetonas, éster e álcalis;
- Regulam resistência química a metanóis e ácidos fortes, no entanto com baixa resistência a fenóis;
- Custo relativamente baixo dentro da classe de polímeros de engenharia.

As maiores áreas de aplicação da Políftalamida são as indústrias têxteis, de automóveis e farmacêuticas (WIEBECK E HARADA, 2005).

A seguir serão relatados os métodos de elementos finitos e *software* utilizado neste trabalho para análise das tensões da carcaça do motorreductor

1.4 MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS

A análise de projetos através do Método de Elementos Finitos (MEF) é uma tecnologia de análise computacional em que o *software* usa o MEF para simular o comportamento físico de um projeto sob circunstâncias de operação específica. Faz-se a divisão de um modelo contínuo em “elementos geométricos”, que são representados matematicamente e/ou graficamente no computador e, assim, os cálculos são feitos pontualmente e, por meio de análises e interações matemáticas, é gerado um resultado na forma de uma malha 3D que cobre e permeia o modelo contínuo. Resolvem-se, assim, as equações diferenciais que governam os fenômenos físicos inerentes ao problema em questão. O MEF permite simular respostas dos projetos e usar estes resultados para melhorar seu desempenho, minimizando a necessidade de protótipos físicos (OLIVEIRA, 2000).

Em linhas gerais, pode-se definir o MEF como um método matemático, no qual um meio contínuo é discretizado (subdividido em elementos que mantêm as propriedades do objeto original). Esses elementos são descritos por equações diferenciais e resolvidos por modelos matemáticos para que sejam obtidos os resultados desejados (LOTTI, MACHADO, MAZZIEIRO, LANDRE, 2006).

Segundo Raquel S. Lotti, em 1943 o conceito de elementos finitos foi apresentado, ainda sem esta denominação, por Richard Courant (1888–1972) e, em 1960, os pesquisadores Turner, Clough, Martins e Topp utilizaram pela primeira vez o nome “Método de Elementos Finitos”, descrevendo-o e detalhando os fundamentos de

seu enorme potencial. A partir de então, o desenvolvimento do MEF foi exponencial, sendo aplicado em diversos campos da Engenharia, Medicina, Odontologia e áreas afins.

O método, quando bem gerenciado, pode proporcionar diversas vantagens em relação a outros estudos, pela facilidade de obtenção e interpretação dos resultados. Entretanto, para a correta execução desta metodologia, é necessária a interação entre profissionais das diversas áreas para que as idéias possam ser postas em prática e resultados corretos e válidos sejam obtidos.

Os resultados de simulação obtidos por meio dos elementos finitos são bastante variados, indo desde a distribuição de tensões e deformações até o preenchimento de matrizes e a detecção do surgimento de trincas. O emprego do método de elementos finitos no estudo da conformação de metais, até o final da década de 80, era baseado no princípio da discretização através de uma malha de elementos finitos. Para essa situação, as formulações de fluxo ou elasto-plástica dos códigos são elaboradas utilizando as informações provenientes da malha de elementos finitos gerada para o modelo a ser analisado (OLIVEIRA, 2006)

Na década de 90 alguns trabalhos começaram a avaliar o emprego do método incorporando um princípio de discretização independente de uma malha. Atualmente, os programas comerciais de elementos finitos para a análise da conformação de metais trabalham com o princípio da discretização através de uma malha.

Assim, o Método dos Elementos Finitos é uma ferramenta extremamente valiosa para ajudar as equipes de engenharia numa das tarefas mais importantes no desenvolvimento de um produto, qual seja a de determinar o seu comportamento estrutural e garantir que não haverá falha tanto em condições normais de operação, como em situações críticas, por intermédio da determinação do panorama de tensões nos diversos componentes (OLIVEIRA, 2006).

Sabe-se, no entanto, que o uso de *softwares* e o MEF são muito vantajosos, porém as desvantagens existem, dentre elas o fato de não haver uma solução perfeitamente compatível, capaz de prever qualquer situação. Sabe-se também da importância de uma ferramenta de auxílio, bastando estudo, compreensão de suas funcionalidades e, principalmente, o bom senso de quem opera com ela. Sabe-se, ainda, que os programas de elementos finitos não são ferramentas que independem do julgamento do analista, pois constituem apenas um auxílio a ele, que deve conhecer os conceitos fundamentais do MEF e o comportamento dos principais elementos da

Biblioteca do Programa (OLIVEIRA, 2006). Uma base conceitual adequada é o melhor caminho para se obter bons resultados nas aplicações práticas do dia-a-dia com os *softwares* de Elementos Finitos.

1.4.1 Análise de projetos

Em seus termos mais simples, a análise do projeto é uma tecnologia poderosa de *software* empregada para simular seu comportamento físico num computador.

“Quebrará?” ... “Deformar-se-á?” ... “Ficará muito quente?” ...

Estes são alguns tipos de perguntas para qual a análise do projeto fornece respostas exatas. Em vez de construir um protótipo e desenvolver regimes elaborados, testando e analisando o comportamento físico de um produto através de estudos e testes em protótipos, os projetistas podem apreciar estas informações com rapidez e precisão diretamente no computador, pois projetar a análise pode minimizar ou mesmo eliminar os protótipos físicos, o que tem feito deste método uma valiosa ferramenta de desenvolvimento, hoje presente em quase todos os campos da engenharia (DASSAULT SYSTEMES, 2012).

Durante os anos 90, o processo de desenvolvimento de produtos começou a evoluir da antiga existência de protótipos-teste para o desenvolvimento de produtos novos dirigidos pela tecnologia de Projeto Assistido por Computador (*Computer Aided Design* - CAD), o que representou, na verdade, uma quebra de paradigma.

Melhor que despende tempo e recursos com a confecção de protótipos e corpos de prova, bem como com a realização dos respectivos testes, é projetar e analisar modelos desenhados em computador, com o auxílio do MEF. Os pacotes de *software* de criação e análise de projeto, no princípio do desenvolvimento do MEF, eram as aplicações únicas, altamente especializadas que foram usadas para as simulações originais e específicas que não poderiam ser testadas eficazmente com protótipos. A construção do reator nuclear é um exemplo do uso inicial da análise de projeto, simulando um cenário e testando ambientes extremamente perigosos, antes de se construir o projeto real (DASSAULT SYSTEMES, 2012).

Para todos os tipos de desenvolvimento, a partir de quando os benefícios da análise de projeto tornaram-se óbvios, o próprio desenvolvimento industrial passou a

tornar-se responsável pela diminuição dos protótipos físicos e pela ampliação do uso da análise computacional do projeto 3D, a partir de meados dos anos 1990, essencialmente em virtude dos seguintes fatores:

- O *software* de modelagem 3D contínuo tornou-se poderoso, acessível, e fácil de usar;
- O *software* da análise de projeto tornou-se poderoso, e acessível a pessoas não especializadas;
- O sistema operacional *Microsoft Windows®* permitiu o uso do CAD e das aplicações da análise em microcomputadores pessoais;
- A própria ferramenta "computador pessoal" tornou-se poderosa, e de confiança.

Nos textos de apresentação de praticamente todos os *softwares* disponíveis no mercado, pode-se constatar a ocorrência de termos comuns a todos os fatores: “mais poderoso”, “mais fácil de usar” e “menos caro” (DASSAULT SYSTEMES, 2012).

O desenvolvimento de ferramentas avançadas para análise de projetos permitiu a indústria tirar vantagem da versatilidade e da capacidade do computador, além do acesso aos benefícios da análise do projeto em tempo real (*mainstream*). Esta poderosa combinação é que tem permitido aos projetistas testarem um projeto diretamente no computador, obtendo resultados tão confiáveis quanto os dos testes físicos realizados antigamente em protótipos.

A figura 10 demonstra as etapas para a análise computacional pelo método de elementos finitos, na sequência: peça projetada 3D, malha de elementos gerada pelo *software* e análise de tensões.



Figura 10: Etapas para análise computacional pelo MEF

Fonte: (DASSAULT SYSTEMES, 2012).

Hoje os modelos CAD são verdadeiros protótipos virtuais e os programas de análise computacional suplantaram os testes físicos, permitindo produzir resultados rapidamente e a um custo reduzido, otimizando, assim, o desenvolvimento de novos processos, equipamentos e componentes. Além disso, o projeto e a análise computacionais permitem exames detalhados do desempenho do produto sempre que for necessário, levando a produtos mais inovadores, mais confiáveis e mais facilmente produzíveis (DASSAULT SYSTEMES, 2012).

1.4.2 SolidWorks Motion/ Simulation

O aplicativo *SolidWorks*® é um *software* de projeto mecânico que usufrui da interface gráfica do usuário conhecida do *Microsoft Windows*®.

Esta ferramenta permite aos projetistas mecânicos esboçar idéias com rapidez, fazer testes com recursos e dimensões, produzir modelos e desenhos detalhados (DASSAULT SYSTEMES, 2012).

Além dos recursos de CAD, o pacote do *SolidWorks*® possibilita realizar simulações de movimentos e análise cinemática e dinâmica de mecanismos também conhecido como dinâmica dos corpos rígidos, através do *SolidWorks Motion*® que é totalmente integrado. Também tem a análise de elementos finitos, através do *SolidWorks Simulation*®. Então, o pacote do *SolidWorks Premium*® proporciona um poderoso ambiente virtual de testes para simulação avançada, de forma que os projetistas possam avaliar problemas difíceis com duração de seus projetos, cenários de carga complexos e problemas de multifísica (DASSAULT SYSTEMES, 2012).

O *SolidWorks Motion*® usa análise de movimento para simular e analisar com precisão os efeitos de elementos de movimento (incluindo forças, molas, amortecedores e atrito) em uma montagem. A análise de movimento usa *solvers*¹ cinemáticos robustos e considera nos cálculos as propriedades dos materiais, além da massa e da inércia. Esta funcionalidade pode também ser usada para plotar os resultados das simulações para uma análise mais detalhada.

¹ Solver - é um termo genérico que indica uma peça de *software* matemático, eventualmente sob a forma de uma forma independente do programa de computador ou como uma biblioteca de *software*, que 'resolve' um problema matemático (DASSAULT SYSTEMES, 2012).

O *SolidWorks Simulation*® fornece, numa mesma tela, soluções para análise térmica, de tensões, frequência, flambagem e otimização. O *SolidWorks Simulation*® usa soluções rápidas, o que torna possível a solução de problemas complexos e reduz o tempo para desenvolvimento e introdução dos produtos no mercado, poupando tempo e esforço na pesquisa de soluções ideais (DASSAULT SYSTEMES, 2012).

Depois de montar o modelo, é necessário ter certeza de que ele funcionará eficientemente no campo. Na ausência de ferramentas de análise, essa tarefa só pode ser cumprida pela execução de onerosos e demorados ciclos de desenvolvimento de produto. Um ciclo de desenvolvimento de produtos consiste tipicamente em:

1. Construir o modelo;
2. Construir o protótipo do projeto;
3. Testar o protótipo em campo;
4. Avaliar os resultados dos testes de campo;
5. Modificação do projeto com base nos resultados dos testes de campo.
6. Construir o modelo;
7. Construir o protótipo do projeto;
8. Testar o protótipo no campo;
9. Avaliar os resultados dos testes de campo;
10. Modificação do projeto com base nos resultados dos testes de campo.

Esse processo continua até que uma solução satisfatória seja encontrada. A análise ajuda na realização das seguintes tarefas:

- Reduzir os custos simulando o teste do modelo no computador em vez de executar os onerosos testes de campo;
- Reduzir o tempo necessário para o produto entrar no mercado, diminuindo a quantidade de ciclos de desenvolvimento;
- Melhora os produtos testando rapidamente vários conceitos e cenários antes da decisão final, desta forma conseguindo mais tempo para pensar em novos projetos.

1.4.2.1 Conceitos básicos de análise

O MEF é uma técnica numérica para análise de projetos de engenharia. O MEF é aceito como método padrão de análise devido à sua generalidade e por ser bastante adequado para implementação de computadores. O MEF divide o modelo em muitas partes pequenas de forma simples, denominadas elementos, conforme figura 11, substituindo eficazmente um problema complexo por muitos problemas simples que devem ser resolvidos simultaneamente (DASSAULT SYSTEMES, 2012).

Os elementos compartilham pontos em comum, chamados *nós*. O processo de divisão dos modelos em partes pequenas é chamado de geração de malha.

O comportamento de cada elemento é bem conhecido quando sujeito a todos os cenários possíveis de carga e apoio. O método dos elementos finitos usa elementos de diferentes formas.

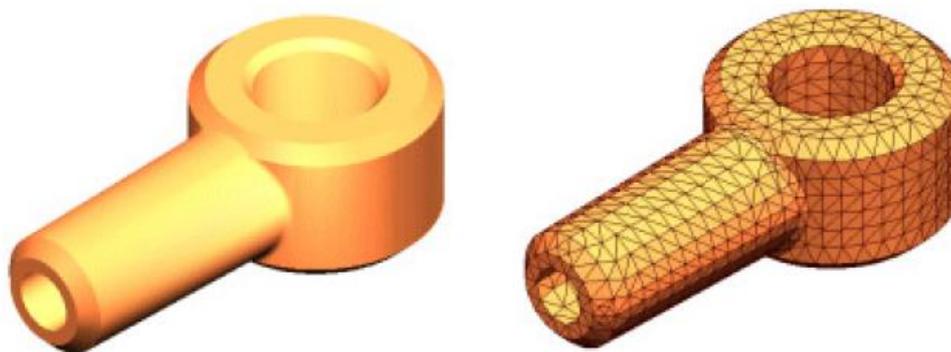


Figura 11: Modelo de peça em CAD e dividido em elementos

Fonte: DASSAULT SYSTEMES, 2012

A resposta em um ponto qualquer de um elemento é interpolada a partir da resposta dos *nós* do elemento. Cada *nó* é completamente descrito por vários parâmetros, dependendo do tipo de análise e do elemento usado. Como exemplo, a temperatura de um *nó* descreve plenamente sua resposta em análises térmicas. De uma forma geral, em análises estruturais, a resposta de um *nó* é descrita por três translações e três rotações, que são chamadas de graus de liberdade (DOF, *Degrees of Freedom*). A figura 12 ilustra um elemento em forma tetraédrica e os pontos vermelhos representam os *nós*. As arestas de elemento podem ser curvas ou retas (DASSAULT SYSTEMES, 2012).

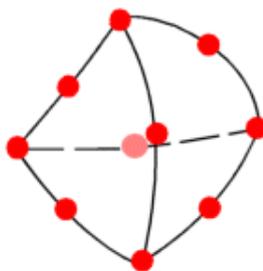


Figura 12: Elemento Tetraédrico e nós

Fonte: DASSAULT SYSTEMES, 2012

O *software* formula as equações diferenciais parciais independentes que controlam o comportamento de cada elemento levando em consideração a conectividade com outros elementos. Essas equações relacionam a resposta a restrições, cargas e propriedades de material que são conhecidas. Não serão tratadas as fórmulas de cálculo do *software*.

Em seguida o programa organiza as equações em um grande conjunto de equações algébricas simultâneas e calcula as incógnitas.

O *software* oferece os seguintes tipos de estudo:

- Estudos Estáticos (ou de tensões): Os estudos estáticos calculam deslocamentos, forças de reação, deformações, tensões e distribuição do fator de segurança. Os materiais falham nos locais em que as tensões ultrapassam certos níveis. Os cálculos dos fatores de segurança são baseados em um dos quatro critérios existentes de falha.

Os estudos estáticos podem ser úteis para evitar falhas decorrentes de altas tensões. Um fator de segurança menor do que a unidade indica falha do material. Grandes fatores de segurança em regiões contíguas indicam tensões baixas e possibilidade de remoção de um pouco de material da região citada (DASSAULT SYSTEMES, 2012).

- Estudos de Frequência: Um corpo retirado de sua posição de repouso tende a vibrar em determinadas frequências chamadas naturais, ou ressonantes. A frequência natural mais baixa é chamada de frequência fundamental. Para cada frequência natural o corpo assume uma determinada forma chamada forma modal. A análise da frequência calcula as frequências naturais e as formas modais correspondentes.

A análise da frequência pode ser útil para evitar que ocorram falhas devido a tensões excessivas provocadas pela ressonância. Também fornece informações para resolver respostas de problemas (DASSAULT SYSTEMES, 2012).

- Estudos dinâmicos: Os estudos dinâmicos calculam a resposta de um modelo devida a cargas que são aplicadas subitamente com tempo ou frequência.

Os estudos dinâmicos lineares se baseiam em estudos de frequência. O *software* calcula a resposta do modelo através da soma da contribuição de cada modo para o ambiente de carregamento. Na maioria dos casos, os modos inferiores contribuem significativamente para a resposta. A contribuição de um modo depende do conteúdo de frequência, da magnitude, da direção, da duração e da localização da carga (DASSAULT SYSTEMES, 2012).

- Estudos de Flambagem: A flambagem diz respeito às deformações súbitas provocadas pelas cargas axiais. Estruturas delgadas sujeitas a cargas axiais podem falhar devido à flambagem sob cargas mais baixas do que as necessárias para causar falha do material. Estudos estáticos podem ajudar a evitar falhas decorrentes de flambagem.
- Estudos Térmicos: Os estudos térmicos calculam temperaturas, gradientes de temperaturas e fluxos de calor com base na geração, condução, convecção e radiação do calor.
- Estudos de Projeto: Os estudos de otimização de projeto automatizam a busca por um projeto ótimo baseado no projeto geométrico. O *software* possui tecnologia para detecção rápida de tendências e para a identificação da solução ótima usando a menor quantidade de execuções.
- Estudos Não lineares: Os estudos não lineares poderão ser usados para resolver o problema quando as hipóteses da análise estática linear não forem válidas. As principais fontes da não-linearidade são: grandes deslocamentos, propriedades de materiais não lineares e contato. Os estudos não lineares calculam deslocamentos, forças de reação, tensões, e tensões correspondentes a incrementos de cargas e restrições variáveis. Quando forças de inércia e amortecimento não podem ser ignoradas, pode-se usar a análise dinâmica não linear.

A resolução de um problema não linear exige muito mais tempo e recursos do que a resolução de um estudo estático linear semelhante (DASSAULT SYSTEMES, 2012).

Os estudos estáticos oferecem uma solução não linear para problemas de contato quando a opção de grande deslocamento está ativada.

- Estudos de Teste de queda: Os estudos de teste de queda avaliam o efeito da queda do projeto sobre um piso rígido. Pode-se especificar a distância da queda ou a velocidade no momento do impacto, além da ocasionada pela gravidade.
- Estudos de Fadiga: Com o decorrer do tempo, o repetido carregamento enfraquece os objetos, mesmo quando as tensões induzidas são consideravelmente menores do que os limites de tensão aceitáveis. Os números de ciclos exigidos para ocorrência das falhas de fadiga em um local dependem do material e das flutuações das tensões (DASSAULT SYSTEMES, 2012).

1.4.2.2 Análise Estática Linear

Quando cargas são aplicadas a um corpo, ele é deformado e o efeito das cargas é transmitido por toda a sua extensão. As cargas externas induzem forças e reações internas, que permitem ao corpo retomar um estado de equilíbrio.

A análise estática linear calcula deslocamentos, deformações, tensões e forças de reação sob o efeito de cargas aplicadas (DASSAULT SYSTEMES, 2012).

A análise linear estática adota as seguintes pressuposições:

- a) Condição estática: Todas as cargas são aplicadas lenta e gradativamente até atingirem suas totais magnitudes. Após atingirem a magnitude total, as cargas permanecem constantes (não variam com o tempo). Esta pressuposição nos permite ignorar forças de inércia e amortecimento causadas por acelerações e velocidades de valor desprezível.

É importante verificar a pressuposição estática, uma vez que uma carga dinâmica pode gerar tensões até $1/(2\xi)$ vezes superiores às geradas por cargas estáticas da mesma magnitude, onde ξ é o coeficiente de amortecimento viscoso. Para uma estrutura levemente amortecida (5% de amortecimento), as tensões dinâmicas serão 10 vezes superiores às estáticas. O pior cenário ocorre quando há ressonância.

Pode-se usar a análise estática para calcular a resposta estrutural de corpos que giram a velocidades constantes ou se deslocam com acelerações constantes, uma vez que as cargas geradas não se alteram com o tempo.

Usa-se os estudos dinâmicos, lineares ou não lineares serve para calcular a resposta estrutural devida a cargas dinâmicas. Cargas dinâmicas incluem cargas oscilantes, impactos, colisões e cargas aleatórias (DASSAULT SYSTEMES, 2012).

b) Condição de linearidade: A relação entre cargas e as respostas induzidas são lineares.

- Todos os materiais do modelo estão de acordo com a Lei de Hooke, que afirma que a tensão é diretamente proporcional à deformação no regime linear elástico.
- Os deslocamentos induzidos são pequenos o bastante para ignorar a alteração de rigidez causada pelo carregamento.
- As condições de limite não variam durante a aplicação das cargas. As cargas precisam ser constantes em magnitude, direção e distribuição. Elas não devem sofrer alteração enquanto o modelo está sendo deformado.

A Figura 13 representa a diferença entre análise linear e não linear.

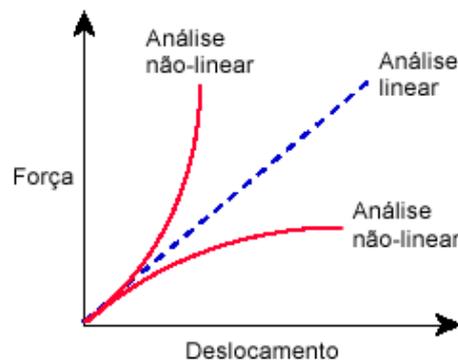


Figura 13: Condição de Linearidade e Não Linear

Fonte: DASSAULT SYSTEMES, 2012.

Como o objetivo do trabalho é realizar uma avaliação da substituição de material da carcaça do motorreductor, será utilizada apenas a análise estática linear para gerar as tensões, deslocamento e deformações.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 METODOLOGIA ADOTADA

Neste tópico são abordados os procedimentos metodológicos utilizados para a elaboração deste trabalho. Com a perspectiva de atingir os objetivos do mesmo, foram planejadas e definidas as etapas de acordo com a seguinte sequência metodológica: definição do problema da pesquisa, definição dos objetivos gerais e específicos, definição da metodologia, pesquisa bibliográfica, pesquisa documental, estudo de caso. Com estas etapas foi realizado o desenvolvimento de um estudo de caso.

Primeiramente o estudo está centrado em uma avaliação de materiais adequados para a substituição do material da carcaça do motorreductor 04 da Imobras, baseado nas características do mesmo. E com o objetivo de determinar o torque no motor elétrico do motorreductor em funcionamento, foi usado um Osciloscópio Tektronix modelo TDS 1002.

De forma complementar, também foi realizada uma simulação através do *software SolidWorks Motion® e Simulation® 2012* para determinar as tensões e deformações presentes na carcaça do motorreductor feito em alumínio SAE 305 quando em pleno funcionamento. Avaliando estas informações, foi possível determinar outros materiais para substituição da carcaça, objetivando a diminuição do custo, a melhoria do processo de fabricação, sem perda da qualidade do produto.

Foram realizados ensaios de funcionamento do motorreductor no laboratório da empresa Imobras, para determinação das características de funcionamento do equipamento, ou seja, atrito, torque e potência. Estes dados foram usados na validação das simulações.

A partir da escolha de materiais poliméricos que atenderam os quesitos técnicos foi realizada uma análise de viabilidade econômica dos mesmos.

3 ESTUDO DE CASO

3.1 HISTÓRICO DA EMPRESA

Desde 2001, a IMOBRAS se destaca como uma empresa ágil que vem se consolidando no mercado. Fabricante de motores e eletroventiladores de corrente contínua, busca sempre a satisfação de seus clientes, trabalhando com empenho para alcançar suas metas de qualidade e excelência.

Para a indústria automotiva de veículos pesados, a IMOBRAS produz motores com tecnologia totalmente nacional, fornecendo itens originais e firmando parcerias com montadoras e empresas do setor e constantemente ampliando seu portfólio de produtos desde sua fundação. Os principais produtos comercializados são: motorreductores para limpadores de para-brisas e automação, atuadores para *damper*, eletroventiladores radiais simples e duplos para ventilação forçada de ar, eletroventiladores axiais para condensadores e evaporadores, e motores universais para cortina de ar e renovação de ar.

As certificações conquistadas reafirmam o comprometimento da empresa com a política da qualidade. Além da ISO, a IMOBRAS obteve importantes conquistas como investimentos em automação. A expressão que a empresa ganhou no mercado internacional está sendo consolidada com exportações principalmente para a América Latina.

Pensando no desenvolvimento da região, a fábrica da IMOBRAS está instalada na cidade de Alto Feliz, gerando empregos e receita para o município, contando ainda com uma fábrica de injeção de polímeros que garante a qualidade de entrega e agilidade no processo. Visando expandir os serviços para um centro industrial de referência, a empresa possui um escritório comercial em Caxias do Sul, favorecendo a proximidade entre a IMOBRAS e seus clientes (IMOBRAS, 2012).

A empresa conta com uma equipe de aproximadamente 70 funcionários e suas operações industriais ocupam aproximadamente 1520 m² de área distribuído conforme layout da figura 14:

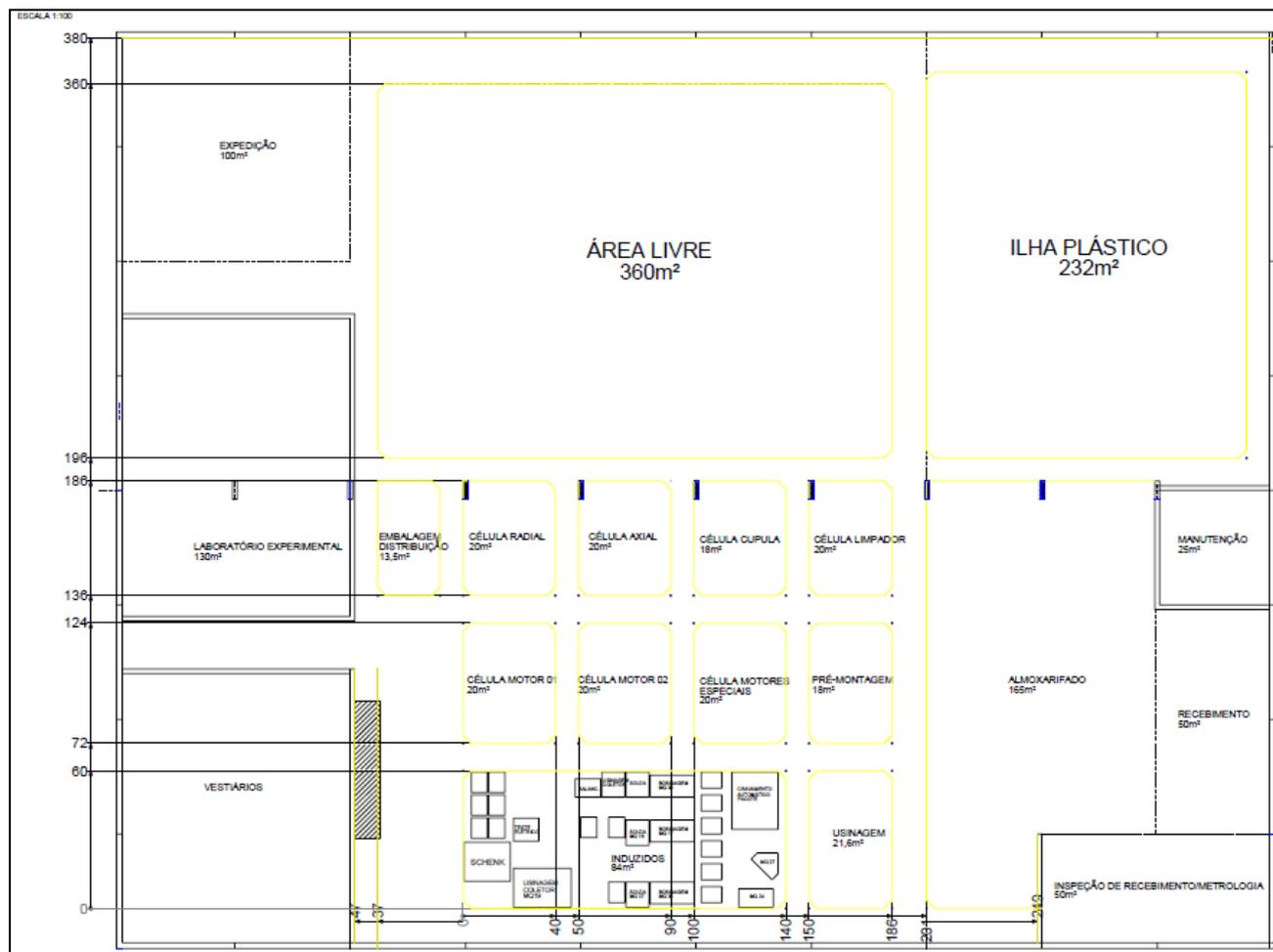


Figura 14: Layout da empresa Imobras

Fonte: IMOBRAS, 2012

O principal objetivo da IMOBRAS é atender seus clientes superando suas expectativas, ofertando ao mercado automotivo produtos que vão ao encontro de suas especificações técnicas, considerando os demais componentes importantes para o setor como prazo de entrega, logística, processo e assistência técnica. A empresa oferece, em seu setor de Pesquisa e Desenvolvimento, um serviço personalizado que trabalha a favor da necessidade de cada cliente, dispondo de soluções avançadas e tecnologia para desenvolver produtos customizados. Apresentando inovação ao mercado, a IMOBRAS é a primeira empresa nacional a fabricar motores eletrônicos usando tecnologia *brushless* (sem escovas) por comutação eletrônica de alta qualidade.

O crescente sucesso da empresa se origina em uma equipe dinâmica e pró-ativa. Os clientes encontram na IMOBRAS um parceiro comprometido em oferecer produtos e serviços de qualidade, expressando confiança que pode ser conferida do início ao fim do processo, passando por projeto, fabricação e entrega (IMOBRAS, 2012).

3.2 COLETA DE DADOS

Os dados referentes aos materiais e suas propriedades foram obtidos através de pesquisa bibliográfica em livros, revistas, sites e catálogos de fornecedores. Os dados de funcionamento (cargas e esforços) foram determinados a partir da simulação numérica.

Os critérios de seleção dos materiais obedeceram aos quesitos abaixo, na seguinte ordem:

1. considerações de resistência mecânica;
2. considerações dimensionais;
3. considerações de temperatura de trabalho;
4. facilidade e disponibilidade de fabricação na empresa;
5. viabilidade econômica.

Para a determinação dos carregamentos na carcaça do motorreductor, foi necessário testá-lo no sistema de ensaio de durabilidade do limpador de para-brisas do laboratório da empresa Imobras (Figura 15), atendendo a Norma SAE J198 (Sistema Limpador de para-brisas - caminhão, ônibus e veículos polivalentes).

Para tanto foram utilizados os seguintes equipamentos:

- osciloscópio marca Tektronix modelo TDS 1002;
- fonte de tensão marca Instruterm modelo FA2030;
- sistema de durabilidade do limpador de para-brisas;
- 2 termopares tipo J;
- multímetro digital marca Minipa modelo ET-2033B.

Os ensaios foram realizados no motorreductor, cód.100410112, que é um modelo com 12 V de tensão nominal. Esta escolha é justificada em função de que esta é a tensão que provoca um maior aquecimento, em relação ao outro modelo de 24 V. Foi avaliado então a pior condição de temperatura para a carcaça com modelo 12 V. Além disto, motorreductor foi configurado para trabalhar, durante os ensaios, com a velocidade máxima a que normalmente está submetido em funcionamento.

O principal objetivo deste ensaio foi determinar o torque do motor elétrico, para que pudesse ser comparado e validado com os resultados da simulação numérica.

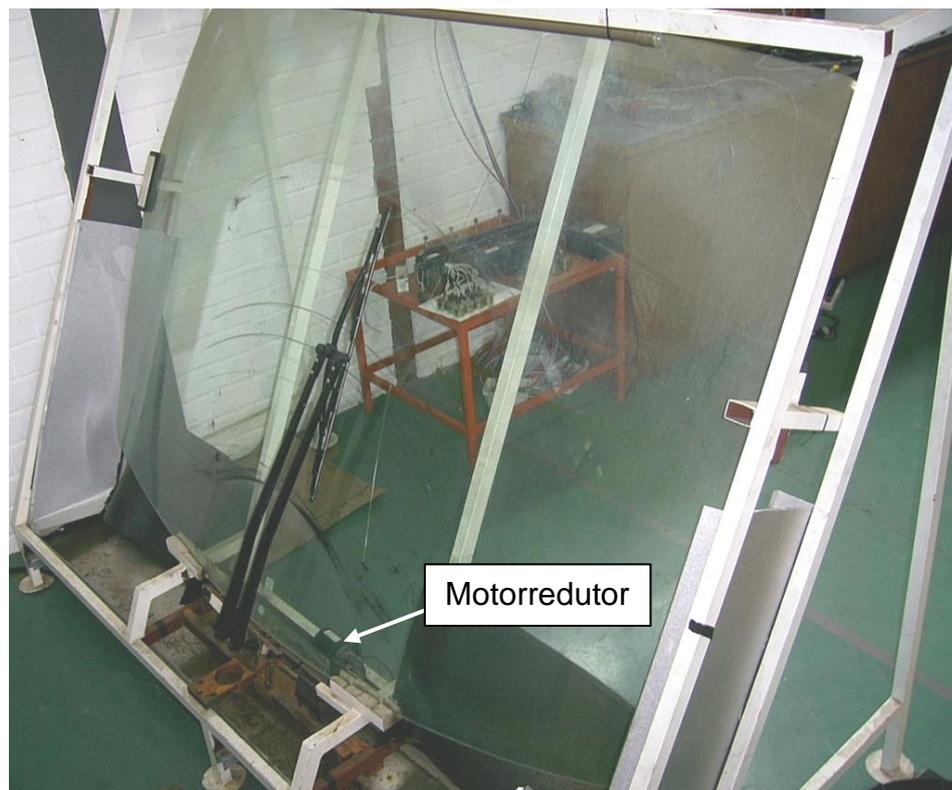


Figura 15: Sistema de ensaio de durabilidade do limpador de para-brisas

Fonte: Elaborado pelo autor

Por meio do gráfico de desempenho do motorreductor escolhido, foi possível determinar o torque do motor elétrico, sabendo-se que a relação de transmissão entre o eixo sem fim e engrenagem de redução é de 1:63.

Conforme abordado nas bibliografias pesquisadas, as considerações térmicas dos polímeros são de extrema importância para a seleção dos mesmos.

O ensaio térmico do motorreductor foi considerado o sistema de testes do limpador de para-brisas em funcionamento por durante 24 horas consecutivas. Foram coletadas as temperaturas na carcaça externa do motorreductor e no tubo externo do motor elétrico, conforme Figura 16.

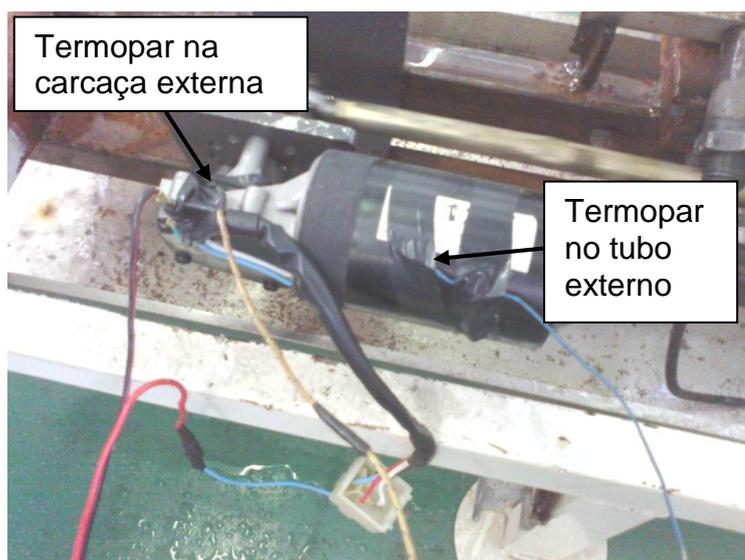


Figura 16: Método medição temperatura no motorreductor

Fonte: Elaborado pelo autor

A análise dos movimentos cinemáticos e carregamentos estáticos e dinâmicos, foi realizada através do *software SolidWorks Motion®*. Foi necessário o modelamento dos mecanismos de transmissão de movimento no *SolidWorks® 2012* para gerar as geometrias das peças. A Figura 17 representa o desenho 3D de todo o mecanismo de transmissão de forças no sistema de limpador de para-brisas. Foi necessário inserir no conjunto de montagem o mecanismo articulado, a base de fixação do motorreductor e articulação, a haste da palheta do limpador, inclusive com a mola para pressionar a palheta ao vidro, a palheta do limpador e o vidro. Além disto também foram incluídas as informações relativas ao tipos de movimentos cinemáticos, geradores de movimento, massas, momentos mássicos de inércia, coeficientes de atrito, etc.

A partir das definições dos ensaios mecânicos, foi possível através do *SolidWorks Simulation®*, fazer uma análise estática na carcaça do motorreductor. O objetivo desta simulação foi avaliar o comportamento da carcaça submetida ao máximo torque encontrado no ensaio.

A análise foi do tipo estática, com comportamento em regime linear elástico. O torque máximo, foi aplicado na superfície do diâmetro interno da carcaça e a fixação nas regiões de furação dos parafusos M6, conforme pode ser verificado na Figura 18.

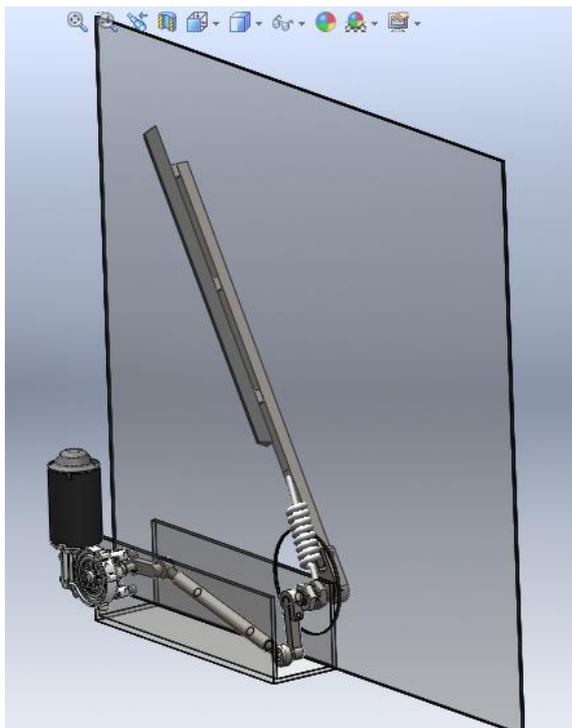


Figura 17: Desenho 3D do mecanismo de transmissão do limpador de para-brisas

Fonte: Elaborado pelo autor

A malha computacional foi criada, na sequência, com elemento sólido, do tipo tetraedro e malha com base de curvatura, em função da complexidade do desenho da peça. Para a execução das análises, adotou-se o modelo de material Isotrópico linear elástico.

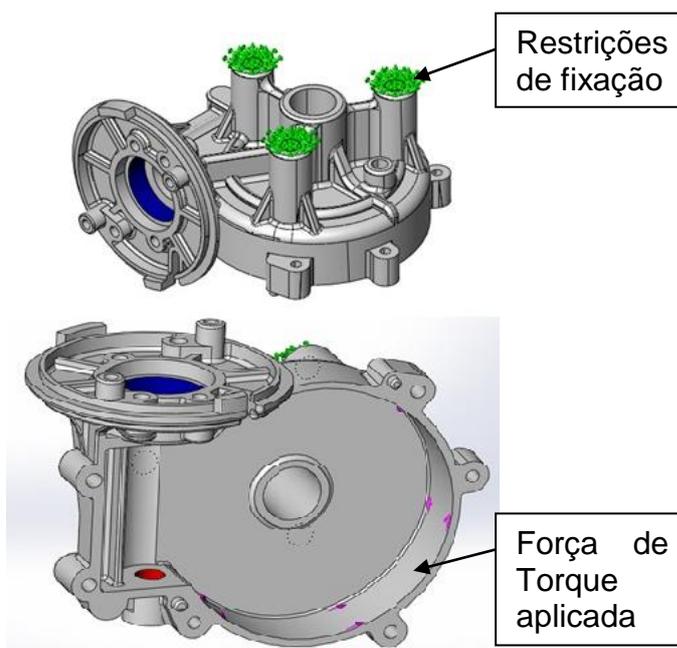


Figura 18: Restrição de fixação e carga aplicada no Simulation

Fonte: Elaborado pelo autor

4 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

A análise computacional da carcaça do motorreductor produzida a partir do alumínio SAE 305 visou obter as tensões, deformações e o fator de segurança, quando o mesmo é submetido à cargas estáticas. Estes resultados determinam as solicitações máximas a que estará sujeita a carcaça do motorreductor, e serão usadas para a seleção do material de substituição do alumínio.

Todas as etapas descritas na metodologia foram seguidas, sendo as análises virtuais executadas dentro do pacote computacional *SolidWorks Motion/ Simulation*®.

Os quatro materiais termopolímeros selecionados apresentam propriedades de interesse para a substituição do alumínio na carcaça do motorreductor automotivo, ou seja, com relação à resistência mecânica, o Poliacetal sem e com carga foi escolhido considerando a sua boa resistência ao impacto mesmo em baixas temperaturas e resistência a fluência superior às Poliamidas. A Poliamida 66 com 33% de fibra de vidro, foi escolhida também devido a seu alto módulo de elasticidade e resistência à tração, enquanto que para Poliftalamida com 30% de fibra de vidro foi escolhido devido às excelentes resistências à tração, flexão, dureza e resistência à fadiga, conforme pode ser verificado na Tabela 11.

Quanto às tolerâncias dimensionais todos os materiais selecionados apresentam desde boa a excelentes tolerâncias, considerando alguns controles no processamento e pós-processamento, segundo Wiebeck e Harada (2005).

Em relação à temperatura de trabalho todos os materiais escolhidos suportam no mínimo 100 °C, e também apresentam boas características em relação à temperatura de deflexão quando sujeitos a uma tensão de 1,8 MPa.

Mas, um dos principais fatores de escolha dos materiais selecionados, devido a grandes infinidades de polímeros existentes no mercado, foi à facilidade de processamento, a disponibilidade das matérias primas, e o já conhecimento pelo setor de injeção de polímeros da empresa Imobras dos materiais Poliacetal e Poliamida. Já a Poliftalamida, embora não utilizada na empresa, e por ser um polímero de alto desempenho e apresentar boa processabilidade, pode ser usada em equipamentos de moldagem convencional e segundo referências bibliográfica e de fornecedores, também foi estudada neste trabalho.

A Tabela 11 apresenta as características mecânicas e físicas dos materiais utilizados no estudo, segundo os fornecedores (Anexos 2, 3, 4 e 5) e complementado com referências teóricas, conforme segue.

Tabela 11: Características mecânicas e físicas dos materiais utilizados no estudo

| Propriedades | Al SAE 305/ A413.0 | PA 66 FV33 | POM 30 FV Copolimer | POM Copolimer | PPA 30% FV | Unidades |
|--------------------------------------|-----------------------|---------------------|------------------------|------------------|-------------------|-------------------|
| Módulo Elástico / Mod. Flexão (E) | 7,00E+10 | 9,5E+09 | 7,00E+09 | 2,4E+09 | 1,12E+10 | N/m ² |
| Coefficiente Poisson | 0,33 | 0,39 | 0,39 | 0,40 | 0,38 | - |
| Módulo Cisalhamento | 2,60E+10 | 3,41E+09 | 2,52E+09 | 8,57E+8 | 4,06E+09 | N/m ² |
| Densidade | 2657 | 1370 | 1630 | 1410 | 1440 | Kg/m ³ |
| Resistência à Tração | 2,95E+08 | 2,50E+08 | 1,20E+08 | 8,0E+07 | 2,60E+08 | N/m ² |
| Limite de escoamento | 1,40E+08 | 1,50E+08 | 8,00E+07 | 5,0E+07 | 1,80E+08 | N/m ² |
| Coefficiente de Expansão térmica | 2,04E-05 | - | - | - | - | /K |
| Condutividade Térmica | 121 | 0,24 | 0,17 | 0,17 | 0,15 | W/(m.K) |
| Calor Específico | 963 | 1670 | 1410 | 1410 | 1550 | J/(kg.K) |
| Impacto Izod | - | ≥90 | ≥45 | ≥50 | ≤100 | J/m |
| Temp. máxima de Deflexão à 1,8MPa | - | ~245 | ~150 | ~100 | ~250 | °C |
| Referência | ASM Handbook | Wiebeck e Pepasa | Pepasa | Pepasa | APTA e Wiebeck | |

Fonte: Elaborado pelo autor

Assim como as características dos materiais, também foram determinados os custos de cada item. A tabela 12 mostra o ao preço de venda dos fornecedores contatados.

Tabela 12: Custo relativo dos polímeros selecionados

| Material | Fornecedor | Preço/ Kg |
|---------------|--------------------------------|-----------|
| PA 6.6 FV 33% | Pepasa Polímeros de engenharia | R\$ 10,80 |
| POM sem carga | Pepasa Polímeros de engenharia | R\$ 6,50 |
| POM FV 30% | Pepasa Polímeros de engenharia | R\$ 10,60 |
| PPA FV 30% | Apta Resinas | R\$ 50,00 |

Fonte: Elaborado pelo autor

Portanto, como se pode verificar o PA6.6 FV33, POM sem carga e o POM FV30 do fornecedor Pepasa apresentam os melhores custos.

4.1 ANÁLISE DOS MOVIMENTOS

Na análise dos movimentos foi possível verificar quantitativamente os resultados obtidos com os ensaios no laboratório e os resultados obtidos com o *SolidWorks Motion*®.

A variação da demanda de corrente do motor elétrico foi determinada com osciloscópio. Os resultados são apresentados na Figura 19.

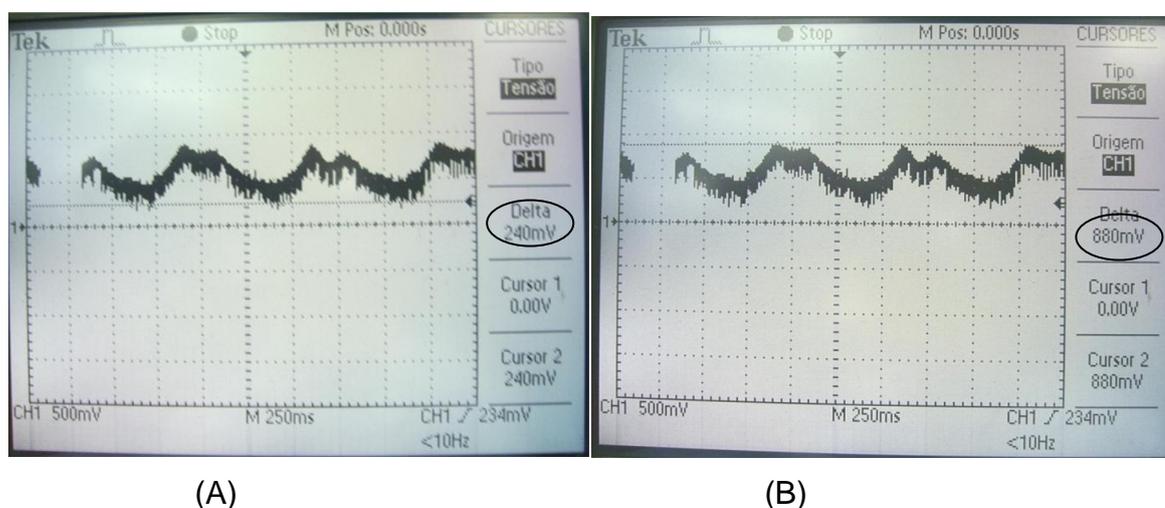


Figura 19: Comportamento da corrente elétrica mínima (A) e máxima (B) do motorreductor

Fonte: Elaborado pelo autor

Pode-se observar na figura 19 o movimento oscilatório da corrente que se encontra na faixa de 2,4 a 8,8 A. Com este resultado é possível obter-se o torque do eixo do motorreductor, utilizando-se o Gráfico 2 (dados de desempenho fornecidos pela Imobras).

A faixa de torque determinada para o motorreductor é de 3 a 15 N.m, conforme pode ser visto no Gráfico 2.

Considerando a relação de transmissão entre o eixo sem fim do motor elétrico e a engrenagem de redução, sendo 1:63, se obtém a faixa de torque do motor elétrico, ou seja, 0,055 a 0,24 N.m.

Os parâmetros definidos para a simulação de movimentos, considerando dados obtidos nos ensaios laboratoriais e coeficientes da biblioteca do *software SolidWorks Motion*® são:

- Motor rotativo no eixo sem fim do motor elétrico com movimento segmentado, conforme Figura 20;

- Força gravitacional de $9,81 \text{ m/s}^2$;
- Contato sólido entre o eixo sem fim e a engrenagem, sendo:
 - Material da engrenagem de nylon e do eixo em aço com graxa;
 - Velocidade de atrito dinâmico $V_k = 10,16 \text{ mm/s}$;
 - Coeficiente de atrito dinâmico $\mu_k = 0,05$;
 - Velocidade estática $V_s = 0,10 \text{ mm/s}$;
 - Coeficiente de atrito estático $\mu_s = 0,08$;
 - Propriedades elásticas de impacto, rigidez $3809,28$ - expoente $=2$, amortecimento máximo $= 1,47$ e penetração $= 0,10 \text{ mm}$.

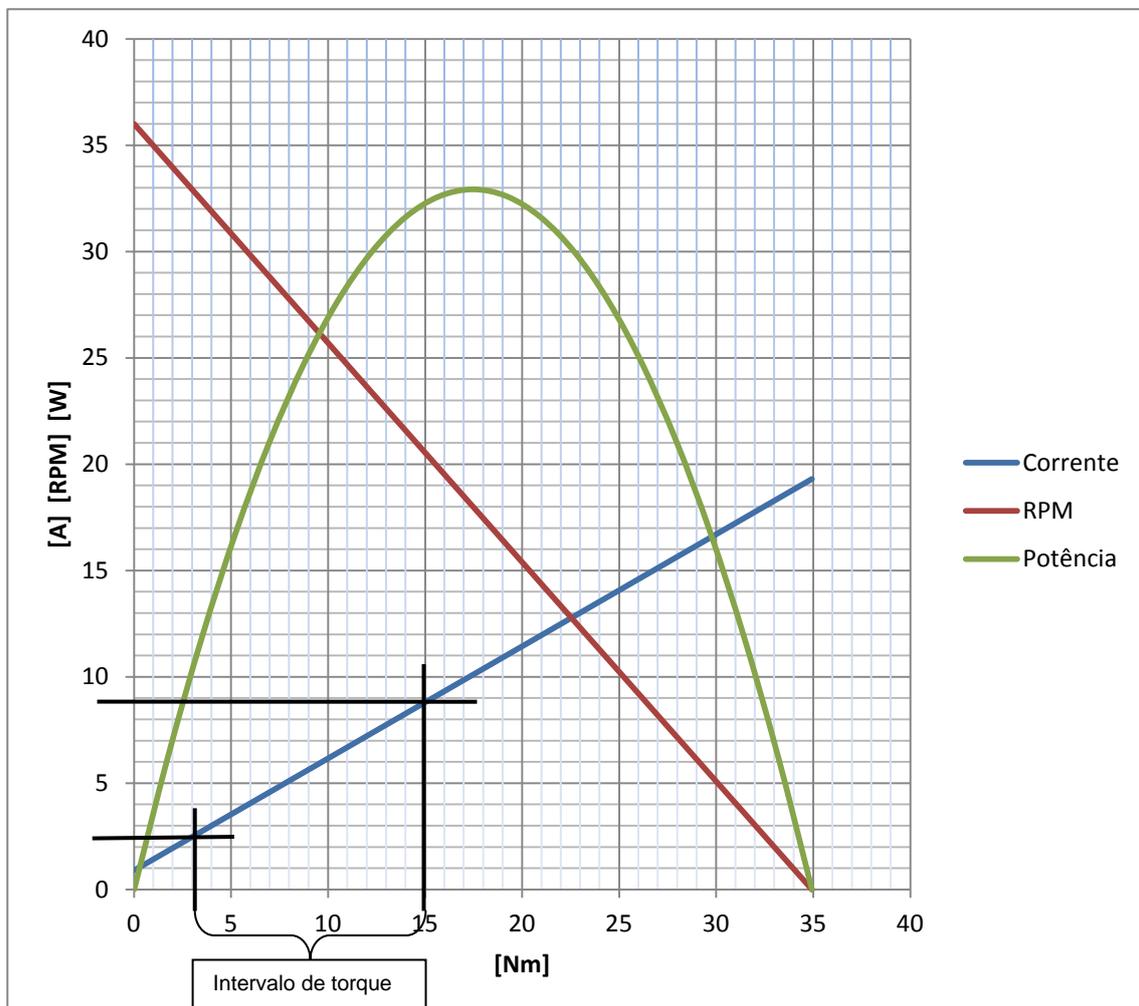


Gráfico 2: Desempenho do motorreductor com a faixa de torque de trabalho

Fonte: IMOBRAS adaptado pelo autor

- Contato sólido entre o vidro e a palheta do limpador, sendo:
 - Material do vidro em aço seco e a palheta de borracha molhada;
 - Velocidade de atrito dinâmico $V_k = 10,16 \text{ mm/s}$;

- Coeficiente de atrito dinâmico $\mu_k = 0,25$;
- Velocidade estática $V_s = 0,10$ mm/s;
- Coeficiente de atrito estático $\mu_s = 0,03$;

Propriedades elásticas de impacto, rigidez 2855,98 - expoente = 1,1 - amortecimento máximo = 0,49 e penetração = 0,10 mm.

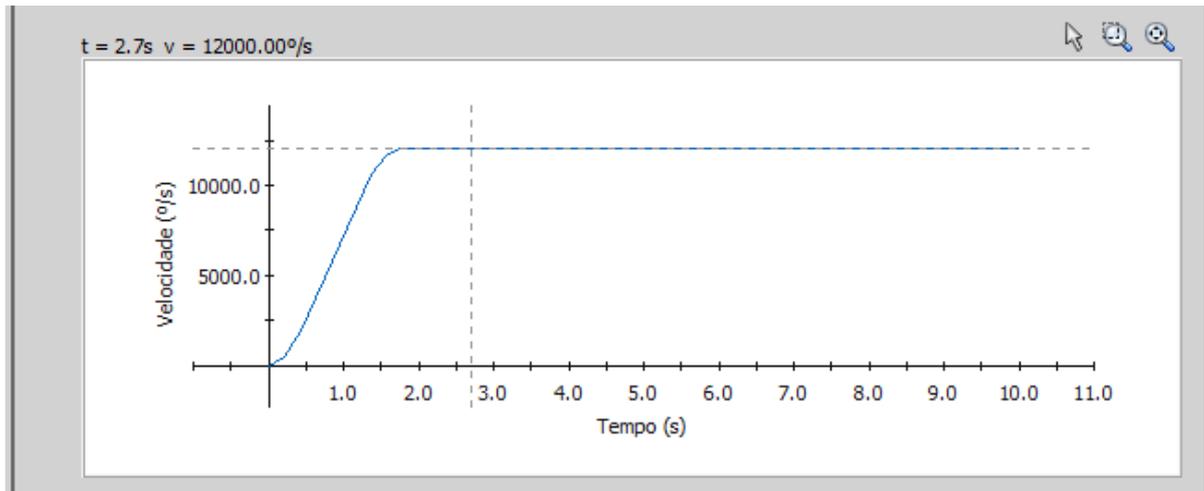


Figura 20: Configuração do motor elétrico para simulação dos movimentos

Fonte: Elaborado pelo autor

- Mola Linear entre a haste do limpador e a porca de fixação do sistema de transmissão com as seguintes características:

- Força da mola como $K_x^e = 1$;
- Constante da mola de 32 N/mm²;
- Comprimento livre de $72,18$ mm;
- Constante de amortecimento linear $Cv^e = 1$ (*linear*)
- Constante de amortecimento torcional $C = 5$ N/(mm/s)
- Diâmetro da bobina de 20 mm;
- Número de bobinas de 7 ;
- Diâmetro do fio de $8,5$ mm.

Para demonstrar a eficácia da simulação dos movimentos com os carregamentos e restrições devidamente aplicados ao sistema e representar a situação realística, pode-se verificar na Figura 21, o gráfico gerado com o movimento e com seus respectivos carregamentos, que apresenta o torque *versus* tempo do motor elétrico durante o funcionamento.

Pode-se analisar que o início do ciclo tem uma aceleração até vencer a inércia do sistema e depois com as cargas cíclicas o movimento repete-se identicamente em intervalos de tempo iguais a 1,75 segundos. O torque máximo é de 226 N.m, mas que a média dos picos é de 228 N.m, ou seja, 0,228 N.m. E o torque mínimo está em aproximadamente 0,025 N.m.

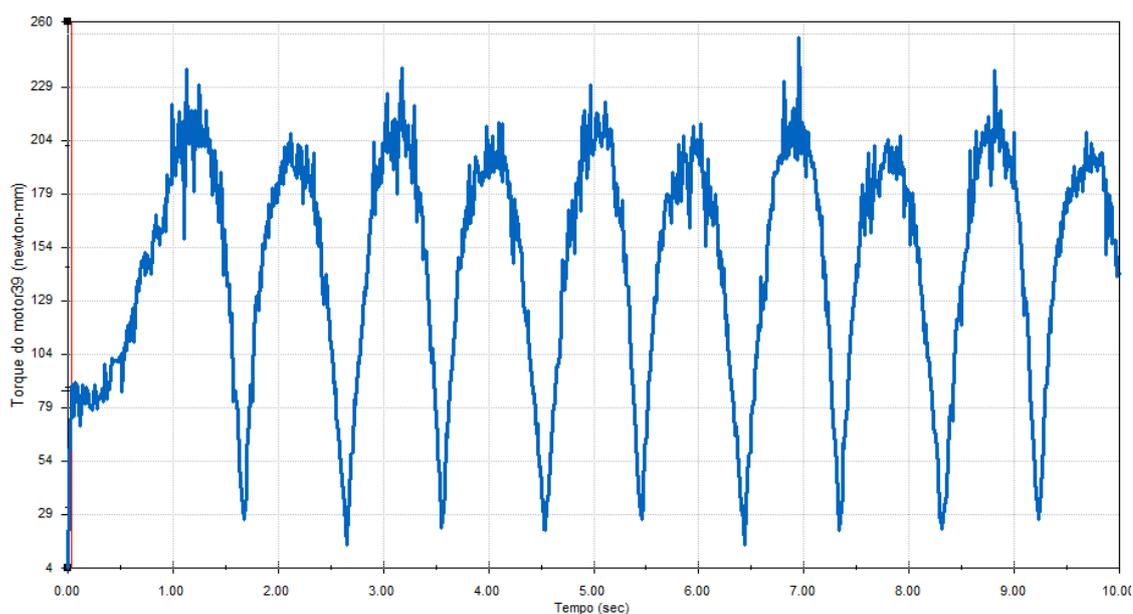


Figura 21: Representação gráfica do Torque versus Tempo no estudo de movimento do motor elétrico

Fonte: Elaborado pelo autor

As simulações realizadas com base no torque do motor elétrico obtidas através dos *SolidWorks Motion*®, reproduziram resultados concordantes com os ensaios do laboratório, representando diferença no torque mínimo de aproximadamente de 50 %. No entanto será considerado somente o torque máximo para estudo de comparação da ferramenta e dos ensaios.

Outra comparação de resultados se refere a velocidade angular do eixo de saída do motorreductor que em laboratório representava a velocidade de 29 a 35 RPM, já na simulação numérica foi encontrado o valor de 190°/s, que equivale a 31,5 RPM, conforme segue na Figura 22.

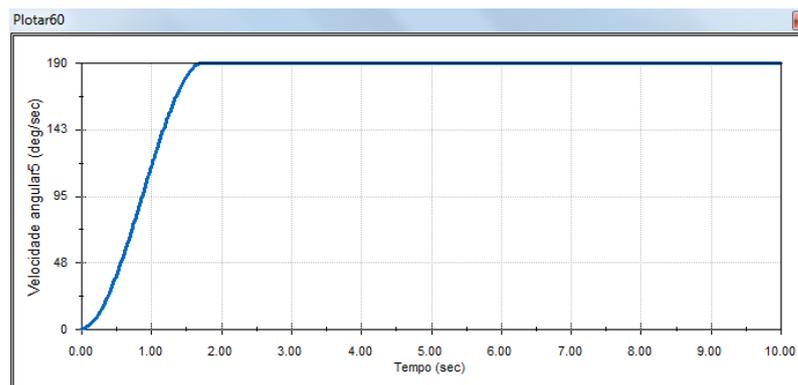


Figura 22: Representação gráfica da velocidade angular no estudo de movimento

Fonte: Elaborado pelo autor

Quanto a velocidade angular do motor elétrico é possível determinar utilizando a relação de redução da engrenagem e eixo sem fim de 1:63, então a velocidade do eixo sem fim é de 2000 RPM. Com a simulação numérica foi possível determinar o mesmo resultado, conforme Figura 23, o valor de 12.000 %/s equivale a 2000 RPM.

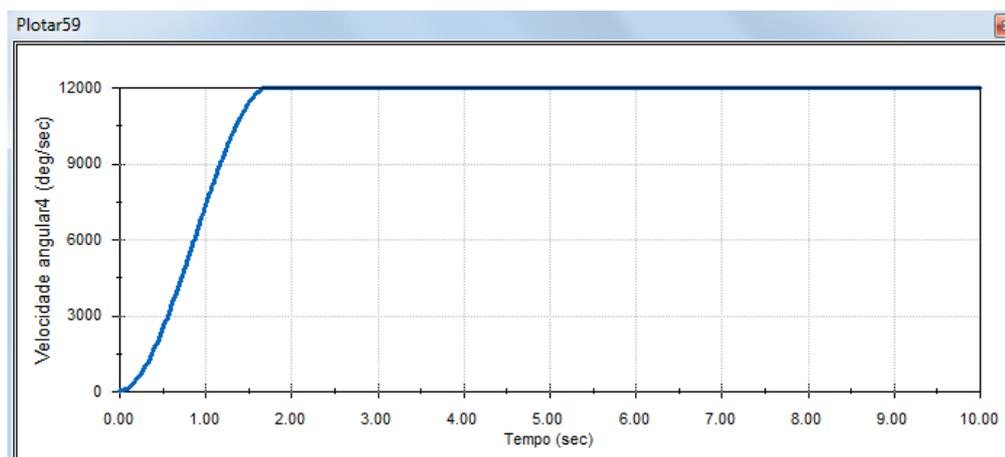


Figura 23: Representação gráfica da velocidade do motor elétrico no estudo movimento

Fonte: Elaborado pelo autor

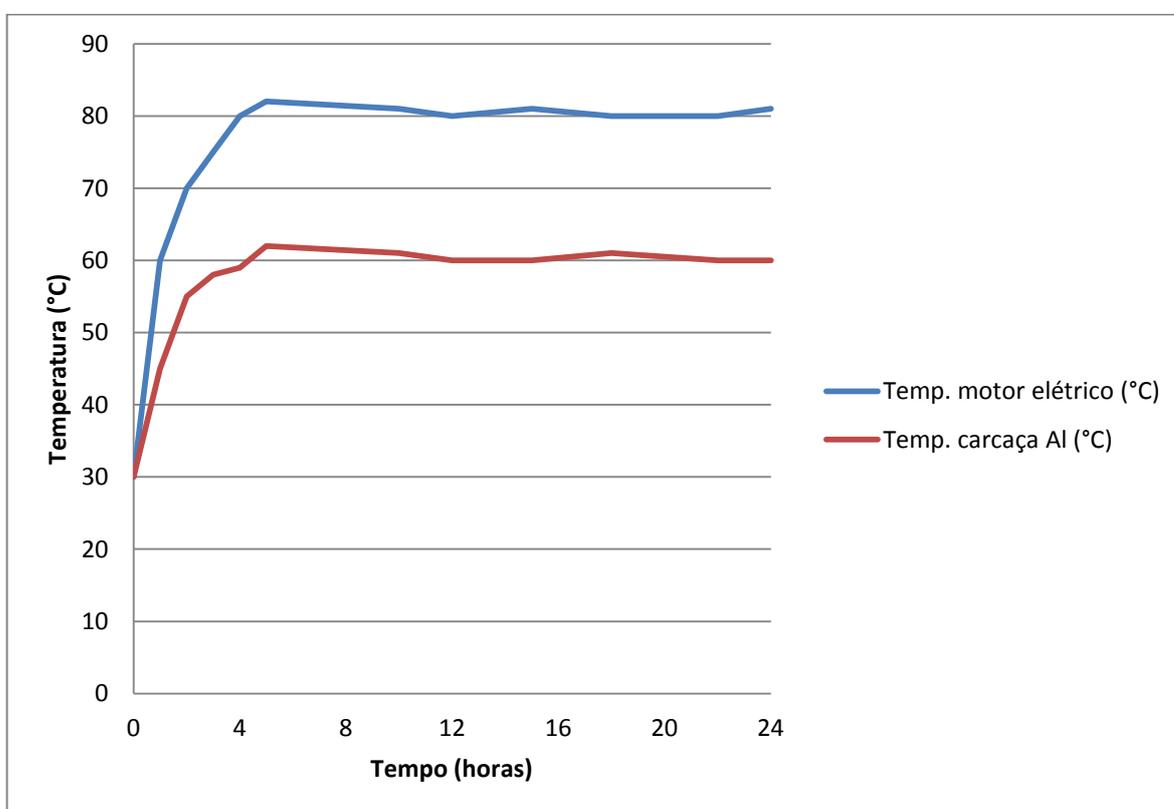
Com efeito, associada aos métodos de processamento computacional, a análise de mecanismos ganha, por um lado, precisão (uma vez que se minimizam os erros inerentes aos métodos analíticos - os erros de truncamento) e, por outro, economia de tempo.

Portanto, o estudo de movimento realizado no *software SolidWorks Motion®*, apresentou resultados satisfatórios, ou seja, apresentou os resultados de modo idêntico aos realizados no laboratório, sendo assim permite ao projetista simular, desenhar, avaliar e visualizar o movimento de um dado mecanismo, sem necessidade de recorrer à construção de um protótipo físico. Além de evitar a realização de inúmeros cálculos e

determinar carregamentos que dificilmente conseguiria determinar em ensaios de laboratório.

4.2 ANÁLISE DO ENSAIO TÉRMICO

Os resultados de temperatura máxima encontrada depois de 24 horas de funcionamento foi de 62°C na carcaça externa do redutor e de 83°C na face externa do tubo do motor elétrico, conforme Gráfico 3 do ensaio térmico no motorreductor.



Gráficos 3: Ensaio Térmico do Motorreductor

Fonte: Elaborado pelo autor

Considerando que a engrenagem do redutor é de Poliacetal copolímero sem carga, e segundo Wiebeck e Harada (2005) a temperatura máxima que este material suporta é de 105 °C, pode-se concluir que este material está adequado para o estudo. E, conforme os materiais selecionados todos apresentam temperaturas de uso contínuo ou intermitente acima dos 100°C.

4.3 ANÁLISE DA SIMULAÇÃO DE ELEMENTOS FINITOS

Na simulação de elementos finitos, foi escolhida a condição automática do método de solução das equações. Nesta condição o próprio programa verifica qual a melhor solução das equações a serem utilizadas, para que os resultados sejam obtidos com maior rapidez e precisão, sendo que o método de solução utilizado foi o FFEPlus.

É importante ressaltar que foram inseridas as propriedades mecânicas do alumínio SAE 305 e dos polímeros, conforme Tabela 11, na biblioteca do *SolidWorks*®.

Na Figura 24 é mostrada a malha computacional gerada para a análise linear elástica com tamanho máximo dos elementos de 7,75084mm e tamanhos do elemento mínimo de 1,55017mm. Isso foi considerado para todos os materiais em estudo, visto que o número de *nós* era diferente para cada material. Foi utilizado 4 pontos Jacobiano e qualidade da malha alta.

Nome do modelo: Carcaça Redutor - PPAFV30
Nome do estudo: Estático PPA FV30
Tipo de malha: Malha sólida

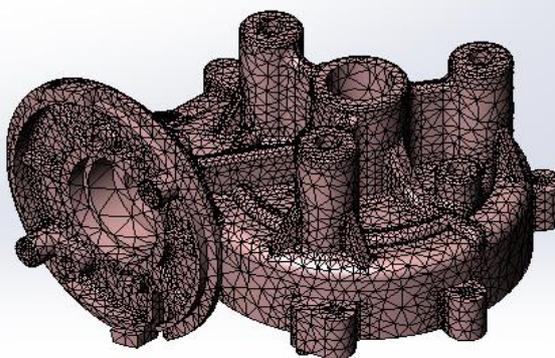


Figura 24: Malha gerada para a simulação da carcaça

Fonte: Elaborado pelo autor

As malhas utilizadas nas simulações foram geradas automaticamente. Os resultados de tensão de *Von Mises*, deformação e fator de segurança encontram-se na Tabela 13, e as plotagens gráficas encontram-se nos Apêndices 1, 2, 3, 4 e 5.

Tabela 13: Resultados da simulação nos materiais

| Características | Al SAE 305 | POM s/ carga | POM FV30 | PA66 FV33 | PPA FV30 | Unidade |
|-----------------------|------------|--------------|----------|-----------|----------|---------|
| Limite Escoamento | 140 | 50 | 80 | 150 | 180 | MPa |
| Tensão Von Mises máx. | 60,8 | 58 | 69,8 | 118 | 59,3 | MPa |
| Deformação máx. | 0,0008 | 0,03 | 0,0096 | 0,0067 | 0,0064 | mm |
| Fator de Segurança | 2,3 | 0,86 | 1,14 | 1,26 | 3,0 | - |

Fonte: Elaborado pelo autor

Os resultados da simulação de MEF encontrados conforme tabela 13, em regime linear elástico e com as condições citadas anteriormente, mostram que o modelo criado para a simulação é bem significativo. Considerando o fator de segurança que é expresso pelo Limite de escoamento/Tensão de Von Mises dos diferentes materiais, foi determinado que o Poliacetal sem fibra de vidro não suportará os carregamentos solicitados, pois foi encontrado o valor de 0,86, ou seja, um fator de segurança menor do que 1,0 indica que o material falhou em determinado local.

Também se pode observar que o PPA FV30 apresenta um fator de segurança ainda maior que o do alumínio, portanto é considerado superdimensionado com as mesmas geometrias. Para a utilização deste material seria necessário redimensioná-lo com a finalidade de economizar material.

Com as simulações realizadas pode-se determinar as melhores tensões que permitem a escolha dos materiais para a substituição do alumínio na carcaça do motorreductor. A análise focou as propriedades de maior evidência para a escolha do material. Nela foi verificada a grande importância do limite de escoamento e a resistência à flexão.

Com relação a deformação máxima encontrada no POM FV30, PA66 FV33 e PPA FV30 a mesma pode ser considerada desprezível.

4.4 ANÁLISE DE VIABILIDADE ECONÔMICA

Como o poliacetal sem carga não foi aprovado na simulação da análise de tensão e a poliftalamida com 30 % de fibra foi considerada superdimensionada e com custo da matéria prima alta, não foi feito a análise de viabilidade econômica destes dois materiais. Foi realizada uma análise de viabilidade econômica para a substituição pela

Poliamida 66 com 33% de FV, sendo que o Poliacetal com 30% FV apresentou uma diferença de R\$ 0,20 menor em relação ao PA66 FV33. Portanto, terá pequena diferença de custo em relação ao outro.

Foi estipulado um investimento para manufatura de molde, pesquisa, protótipo, ensaios e matéria prima conforme Quadro 1.

| QUADRO DE INVESTIMENTO | | | | | |
|------------------------|-------------------------|-----|---------------|----------------------|------------------------------|
| ITEM | ESPECIFICAÇÃO | QT | R\$ UNIT. | R\$ TOTAL | CAPITAL PRÓPRIO/ TERCEIRO |
| 1 | Molde | 1 | R\$ 40.000,00 | R\$ 40.000,00 | PRÓPRIO |
| 2 | Pesquisa/ Horas Técnico | 200 | R\$ 12,00 | R\$ 2.400,00 | PRÓPRIO |
| 3 | Manufatura de protótipo | 5 | R\$ 500,00 | R\$ 2.500,00 | PRÓPRIO |
| 4 | Ensaio | 1 | R\$ 2.000,00 | R\$ 2.000,00 | PRÓPRIO |
| 5 | Matéria Prima | 10 | R\$ 10,80 | R\$ 108,00 | PRÓPRIO |
| | | | TOTAL | R\$ 47.008,00 | |

Quadro 1: Lista de investimentos estipulado

Fonte: Elaborado pelo autor

Conforme observado, a empresa necessitará de R\$ 47.008,00 para iniciar o projeto. No total deste investimento foi incluída a manufatura do molde de injeção da carcaça de Poliamida, ou seja, este é o maior custo de investimento considerando um molde de excelente qualidade e com a possibilidade de sobre injetar as roscas e buchas na carcaça.

O preço de venda das carcaças de polímero foi determinado considerando o custo da matéria prima de R\$ 10,80 e o peso das carcaças segundo modelo matemático de 100 gramas, os impostos e margem de contribuição da empresa. Assim, definiu-se o custo unitário em R\$ 2,16 e o custo de venda em R\$ 5,56.

Para se projetar a receita do projeto, foi verificada a quantia de produtos vendidos mensalmente referente ao ano de 2011 de motorreductores tamanho 4. A partir daí, se definiu a previsão de receita para carcaça de polímero, segundo Apêndice 6:

A margem de contribuição de 35% já é adotada pela empresa para determinação do preço de venda de todos os produtos acabados.

Para se determinar o custo de hora homem, utilizou-se o valor de R\$ 6,50 a hora do operador da máquina injetora e multiplicado por 200 horas por mês.

Para o Custo da máquina Injetora estipulou-se R\$ 150.000,00 e a vida útil em 10 anos, com isso foi determinada à amortização do equipamento. A potência do motor somado a das resistências é de 18,4 KW e o preço da energia elétrica em R\$ 0,60 por

KW. Com esses dados é possível determinar o custo de hora máquina, conforme segue quadro 2.

| CALCULO DO CUSTO/HORA/MÁQUINA | | | |
|-------------------------------|--------------------|-----------------------|-----------|
| TIPO DE CUSTO | FORMULA DE CALCULO | | |
| AMORTIZAÇÃO DO EQUIPAMENTO | R\$ 15.000,00 | $2,37 \times 10^{-4}$ | R\$ 3,55 |
| CUSTO DE ENERGIA | 18,40 | 0,6 | R\$ 11,04 |
| TAXA/HORA/ MÁQUINA | | | R\$ 14,59 |

Quadro 2: Cálculo custo hora máquina

Fonte: Elaborado pelo autor

Os custos variáveis e a previsão de receita do projeto encontram-se no Apêndice 7.

O fluxo de caixa mostra que a empresa tem dinheiro para pagar suas contas, servindo também como uma ferramenta gerencial para a tomada de decisões. Sendo assim, o fluxo de caixa projetado encontra-se no Apêndice 8.

A partir dos resultados apurados pelo fluxo de caixa, são realizados os cálculos para verificar a sua viabilidade, tanto econômica quanto financeira do projeto. Como ferramentas para a análise financeira, foram utilizados PBS, PBD, onde serão colocados os resultados dos cálculos no Quadro 3.

| | | | |
|--------------|--------------|-----------------------------|---------------|
| PBS = | 10,28 | menor que 12 aceitar | Aceito |
| PBD = | 10,73 | menor que 12 aceitar | Aceito |

Quadro 3: Índices de retorno

Fonte: Elaborado pelo autor

PBS – *Payback* Simples: é o tempo necessário para recuperar o capital inicial investido. Neste projeto, foi estimado o tempo de 10,28 meses para a recuperação do capital investido inicialmente. Como segue no quadro 3.

PBD – *Payback* Descontado: tem os mesmos fundamentos do simples, porém ele inclui o custo de oportunidade para medir o tempo de retorno do capital investido. Como inclui o custo de oportunidade neste índice, o tempo estimado para o retorno do capital investido é de 10,73 meses.

Em apêndice 9 esta o quadro com todos os Índices de viabilidade econômica e os resultados estes índices.

Analisando os custos que podem ser evitados em decorrência da economia anual obtida nos custos, os sistemas montante do segmento considerado pela postergação dos investimentos e/ou redução de despesas operacionais está relacionado

ao custo de energia evitado. Para quantificar os custos totais evitados, multiplica-se a quantidade da demanda e do custo do produto evitados, pelos respectivos "custos unitários evitados".

Portanto, pode-se observar no quadro 4 que o custo evitado anual para o projeto é de R\$ 24.750,00 para carcaça motorreductor tamanho 4 da empresa Imobras.

| | Custo Unitário | Médio Volume mensal | Total | Custo Evitado mensal | Custo Evitado Anual |
|----------------------|-----------------------|----------------------------|--------------|-----------------------------|----------------------------|
| Peça Al | R\$ 3,54 | 1500 | R\$ 5.302,50 | R\$ | R\$ |
| Peça Polímero | R\$ 2,16 | 1500 | R\$ 3.240,00 | 2.062,50 | 24.750,00 |

Quadro 4: Custo Evitado do projeto

Fonte: Elaborado pelo autor

A viabilidade econômica do projeto ocorre a partir do ponto em que os custos inerentes à mesma são menores do que aos custos evitados com a utilização do Polímero ao Al.

Nesta análise não foram contabilizados os custos de usinagem e montagem dos periféricos da carcaça do motorreductor em alumínio, visto que os mesmos serão sobre injetados na carcaça durante a injeção em polímero. No entanto, este custo evitado será ainda maior se levar em consideração a otimização do processo.

Todos os resultados obtidos definem como viável o projeto de substituição em questão. Desta forma, caso o investidor queira concretizá-lo, poderá se basear neste projeto de custos para a execução.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A indústria automobilística desde o seu surgimento, investe constantemente em pesquisas com o objetivo de aperfeiçoar e melhorar as características dos materiais utilizados na construção dos automóveis e conseqüentemente seu desempenho de um modo geral. A necessidade de materiais mais leves e resistentes e de produção mais flexível tornou o polímero alvo destes estudos e aos poucos um dos materiais mais utilizados pela indústria neste seguimento. Somente com a descoberta e aprimoramento dos polímeros de engenharia e de alto desempenho é que se tornou possível a substituição dos materiais tradicionalmente utilizados pelo polímero.

Este trabalho teve como objetivo, avaliar a possibilidade de substituição do material da carcaça do motorreductor automotivo tamanho 04 da empresa Imobras, baseado em simulação numérica. Para alcançar este objetivo foi necessário realizar revisão bibliográfica a respeito dos itens pertinentes, determinar materiais com propriedades mecânicas similares ao do alumínio, desenvolver um modelo computacional para analisar as tensões e deformações, e avaliar a viabilidade econômica para substituição.

A simulação dos movimentos realizados pelo pacote comercial *SolidWorks Motion*® 2012, apresentou resultados satisfatórios, comprovando a eficácia desta ferramenta para avaliar e visualizar movimentos em um dado mecanismo, sem necessidade de recorrer à construção de protótipos físicos.

A análise de simulação numérica através de elementos finitos, desenvolvido como ferramenta *SolidWorks Simulation*® 2012 de auxílio para avaliar a substituição do material da carcaça do motorreductor automotivo, mostrou-se capaz de reproduzir o comportamento das mesmas quando sujeitas às condições de carregamento estáticos, suportando o torque máximo exigido.

Como base no estudo, foram levantados os atuais dados financeiros e econômicos do projeto. A partir das informações gerenciais de gastos obtidas nos meses decorrentes do ano de 2011, foram estimados os valores para a projeção de caixa do projeto. Com isto, foi possível verificar se a substituição do alumínio pelo Poliamida 66 com 33% de fibra de vidro e o Poliacetal com 30% de fibra de vidro representam ganho, ou seja, aumentará a rentabilidade da empresa como um todo, e também sua viabilidade.

Como limitação encontrada na resolução do trabalho, pode-se citar o fato do autor trabalhar na área de atuação do tema proposto, mas não especificamente com análise de elementos finitos. No entanto, procurou-se aprofundar para interpretação do *software* e melhor método de análise dos resultados. Fatos estes que podem acabar ocasionando a possibilidade de buscar mais a aplicação desta ferramenta e direcionando a busca por soluções através de meios já conhecidos.

Quanto às dificuldades encontradas, pode ser citada a seleção de referencial teórico específico sobre o alumínio e elementos finitos, mas os mesmos foram sanados pela pesquisa por bibliografias internacionais. Mas a principal dificuldade foi a utilização do *software SolidWorks Motion e Simulation®*.

Segue como sugestão para futuros trabalhos, realizar uma simulação numérica na carcaça em alumínio com cargas dinâmicas dentro do *SolidWorks Motion®*, visto que é possível utilizar o modelo computacional criado para análise dos movimentos e analisar somente a peça com os carregamentos que variam no tempo considerando velocidade, acelerações e forças de inércia de todo o sistema do limpador de para-brisas.

A oportunidade de desenvolver este projeto para um aluno de engenharia foi muito gratificante. Nele pude testar os conhecimentos adquiridos durante o curso, nas mais diversas áreas, e também colocar em prática estes conhecimentos. A partir desse desafio constatou-se que mesmo ele superado, é necessário buscar sempre mais conhecimento em parceria com fornecedores, colaboradores e instituições de ensino.

REFERÊNCIAS

ANTUNES, Izildo; FREIRE, Marcos A. C. **Elementos de máquinas**. 1. ed. São Paulo, SP: Érica, 1998. (1) p. ISBN 85-7194-518-7

ASM Metals HandBook Volume 02 - **Properties and Selection Nonferrous Alloys Especial-Purpose Materials**. 1990

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DO ALUMÍNIO – **ABAL**. São Paulo. Disponível em: <<http://www.abal.org.br>>. Acesso em: 09 setembro 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Materiais metálicos – Ensaio de tração à temperatura ambiente** – NBR ISO 6892. Rio de Janeiro - RJ: ABNT, 2002.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Produtos planos de aço – Determinação das propriedades mecânicas à tração** – NBR ISO 6673. Rio de Janeiro - RJ: ABNT, 1981.

AUTO HOWSTUFFWORKS. Disponível em: <<http://auto.howstuffworks.com/wiper1.htm>> Acesso em 21/07/2012 as 19h.

AZEVEDO, Álvaro F. M.. **Método dos Elementos Finitos**. Porto, Portugal: Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2003. 258 p. Disponível em: <www.alvaroazevedo.com/publications/...aa.../Livro_MEF_AA.pdf>. Acesso em: 21 set. 2012.

BEER, F.; JOHNSTON, E. - **Mecânica Vectorial para Engenheiros** - Dinâmica. 7ª Edição, Editora McGraw-Hill Ltda., 2006.

BOSCH. Disponível em: <http://www.bosch.com.br/br/autopecas/produtos/eletrica/limp_parabrisa.htm> Acesso em: 21/07/2012 as 18h.

CALLISTER JÚNIOR, William D. **Ciência e engenharia de materiais: uma introdução**. 7. ed. Rio de Janeiro, RJ: LTC, 2008. xx, 705 p. ISBN 9788521615958

CANEVAROLO JÚNIOR, Sebastião V. **Ciência dos polímeros: um texto básico para tecnólogos e engenheiros**. 2. ed., rev. e ampl. São Paulo, SP: Artliber, 2006. 280 p. ISBN 8588098105

CARVALHO, Marcelo P. **Análise de Tensões e Deformações em estruturas Termoplásticas usando o Método de Elementos Finitos**. 2007. 138 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia e Tecnologia Dos Materiais, Departamento de Programa De Pós-graduação Em Engenharia E Tecnologia De Materiais, Pucrs, Porto Alegre, 2007.

CHANDA, M., Roy, S. K. – **Plastic Techonology Handbook**, 1ª Edição, New Jersey, 1987.

COSTA, Paulo G. **A Bíblia do Carro**. São Paulo. Copyright, 2002

COLLET, Adriana. **INFLUÊNCIA DO TRATAMENTO: ESCORIFICAÇÃO, REMOÇÃO DE GASES, REFINO E MODIFICAÇÃO DE SILÍCIO, SOBRE A MICROESTRUTURA E PROPRIEDADES MECÂNICAS DE UMA LIGA DE ALUMÍNIO-SILÍCIO EMPREGADA NA FABRICAÇÃO DE MOLDES PARA SOLADO DE CALÇADO**. 2007. 102 f. Tcc (Graduação) - Curso de Engenharia Industrial, Departamento de Icet, Universidade Feevale, Novo Hamburgo, 2007.

COOK, R. D., Malkus, D. S., Plesha, M. E. – **Concepts and Applications of Finite Element Analysis**, Third Edition, University of Wisconsin, 1989.

DASSAULT SYSTEMES SOLIDWORKS CORP. Disponível em: www.solidworks.com. Acesso em: agosto de 2012.

FRANSMAN, M.: **Technology and economic development**. Wheatsheaf Books, Brighton, 1986.

GASPARIN, Alexandre Luís. **COMPORTAMENTO MECÂNICO DE POLÍMERO TERMOPLÁSTICO PARA APLICAÇÃO EM ENGENHARIA AUTOMOTIVA**. 2004. 125 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Departamento de Materiais da Escola de Engenharia da Ufrgs, Ufrgs, Porto Alegre, 2004.

GÓES, Claudio Moreira De. **A influência dos materiais polímeros na indústria automobilística**. 2011. 80 f. Trabalho de Conclusão (Graduação) - Curso de Tecnologia em Produção de Plástico, Departamento de Centro Paula Souza, Faculdade de Tecnologia de Zona Leste, São Paulo, 2011.

HEMAIS, Carlos A. - **Polímeros e a indústria automobilística. Polímeros: Ciência e Tecnologia**. São Paulo, v. 13, nº2, p. 107 – 114, 2003

International Aluminium Institute. Disponível em: <http://www.worldaluminium.org>. Acesso em: 10 setembro 2012.

IMOBRAZ IND. MOTORES ELÉTRICOS LTDA. Disponível em: <http://www.imobras.ind.br> Acesso em: 15 de setembro de 2012.

KLEIN, Cátia Dulcinéia Francisco. **SÍNTESE E CARACTERIZAÇÃO DE POLIÉSTERES TERMOPLÁSTICOS**. 2009. 90 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia e Tecnologia Dos Materiais, Departamento de Programa De Pós-graduação Em Engenharia E Tecnologia De Materiais, Ufrgs, Porto Alegre, 2009.

LOTTI, R. S.; MACHADO, A. W.; MAZZIEIRO, E. T.; LANDRE JR. **Aplicabilidade científica do método dos elementos finitos**. 2. ed. Maringá, PR: Scielo, 2006. 11 v.

MANO, Eloisa Biasotto; MENDES, Luís Cláudio. **Introdução a polímeros**. 2. ed. rev. e ampl. São Paulo, SP: Edgard Blücher, 1999. 191 p. ISBN 8521202474

MANO, E.B. **Polímeros como materiais de engenharia**. São Paulo: Edgard Blücher, 1996. 197p.

MOTTA, L. A. C., Sikunas, N., Rodolfo Júnior, A. – **Durabilidade de Polímeros**. Universidade de São Paulo, Escola Politécnica, Departamento de Engenharia de Construção Civil, São Paulo, 2002.

NIEMANN, Gustav. **Elementos de máquinas**. (1. ed.) São Paulo, SP: Edgard Blücher, 1995. 3 v.

OLIVEIRA, E. J. **Biomecânica básica para ortodontistas**. 1. ed. Belo Horizonte: UFMG, 2000. 196p.

OLIVEIRA, Rodrigo Cruz. **Levantamento da Aplicação do Método de Elementos Finitos em problemas de transformação mecânica dos metais**. UFOP 2006

POLÍMERO INDUSTRIAL. São Paulo, SP: Aranda Editora, 200u-. ISSN 1808-3528

PRODANOV, Cleber Cristiano; FREITAS, Ernani Cesar de. Metodologia do Trabalho Científico: **Método e técnicas da pesquisa e do trabalho acadêmico**. Novo Hamburgo: Feevale, 2009. 288 p.

QUICKPLAST. **O triunfo do polímero no setor automobilístico**. 2005 , s.p.
Disponível: http://www.pecasplasticas.com/artigos_newsletter_otriunfodoplastico.asp
Acesso: em novembro de 2012.

RIBEIRO, Fernando L. B.. **Introdução ao Método de elementos finitos**. Rio de Janeiro: Cope/ Ufrj - Programa de Engenharia Civil, 2004. 93 p. Disponível em: <www.tecgraf.puc-rio.br/~amiranda/MEF/.../Formulacao_do_MEF.pd...>. Acesso em: 21 set. 2012.

RUBIN, I. I. **Handbook of Plastic Materials and Technology**. First Edition, New York, 1990.

SEYMOUR, R. B. – **Polymers for Engineering Applications**, Second Edition, Missouri, 1990.

SQUENAL, E. C. – **Sobre o Comportamento Estrutural dos Termopolímeros**. Universidade de São Paulo, Escola Politécnica, São Paulo, 2002.

SOCIETY OF AUTOMOTIVE ENGINEERS. **Sistemas de Limpador de para-brisas - caminhão, ônibus e veículos polivalentes** - SAE J198, 2000. Washington, USA.

TOLEDO, Jose Carlos de. **GESTÃO DA MUDANÇA DA QUALIDADE DE PRODUTO**. 1994. 22 f. Artigo (Gestão Produção) - Curso de Engenharia de Produção, Departamento de Engenharia de Produção, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 1994.

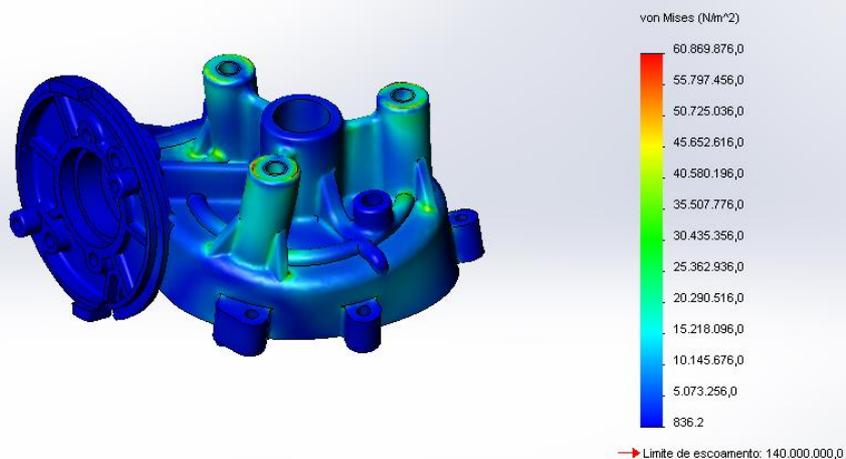
WIEBECK, HÉLIO; HARADA, JÚLIO. **Polímeros de Engenharia**. São Paulo, SP: Artiliber, 2005. 350 p

ZIMMERMANN, Matheus Vinicius Gregory. **Polímeros**. 2011. 331 f. Curso Extensão (Especialização) - Curso de Polímero, Imobras Ind. Motores Elétricos, Alto Feliz, Rs, 2011.

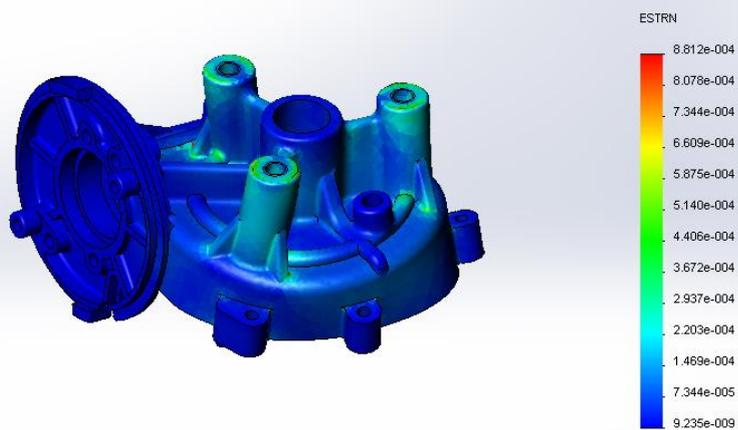
APÊNDICES

APÊNDICE 1 - RESULTADO DAS TENSÕES DO ALUMÍNIO SAE 305

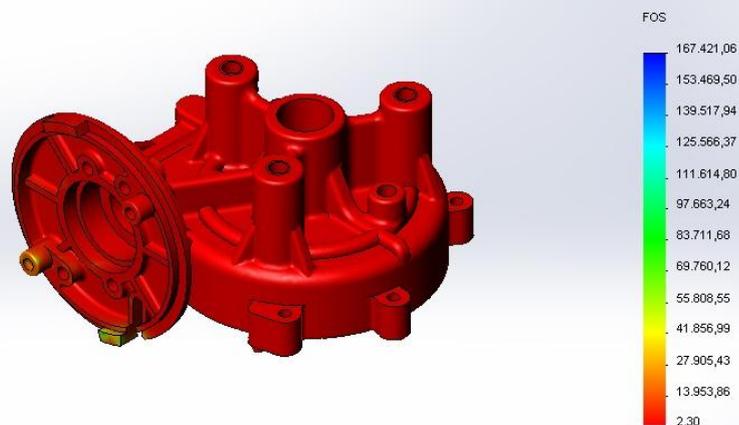
Nome do modelo: Carcaça Redutor - Al 305
 Nome do estudo: estático Al 305
 Tipo de plotagem: Estático tensão nodal Tensão1
 Escala de distorção: 282,029



Nome do modelo: Carcaça Redutor - Al 305
 Nome do estudo: estático Al 305
 Tipo de plotagem: Deformação estática Deformação1
 Escala de distorção: 282,029

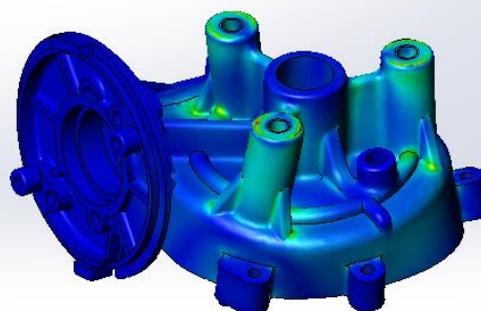


Nome do modelo: Carcaça Redutor - Al 305
 Nome do estudo: estático Al 305
 Tipo de plotagem: Fator de segurança Fator de segurança1
 Critério: Automático
 Distribuição do fator de segurança: Mín. FOS = 2,3

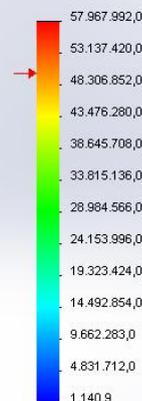


APÊNDICE 2 - RESULTADO DAS TENSÕES DO POM SEM CARGA

Nome do modelo: Carcaça Redutor - POM sem carga
 Nome do estudo: Estático POM sem carga
 Tipo de plotagem: Estático tensão nodal Tensão1
 Escala de distorção: 9.66565

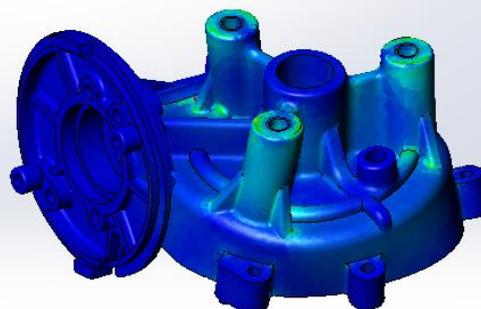


von Mises (N/m²)

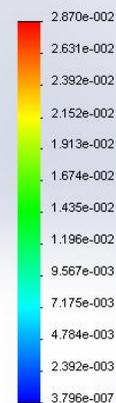


→ Limite de escoamento: 50.000.000,0

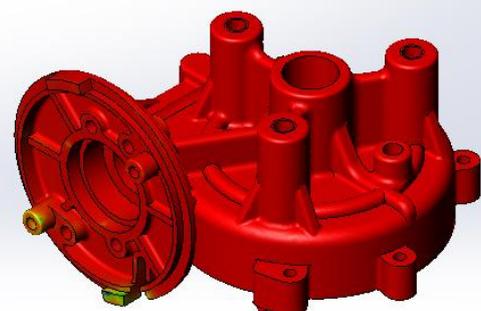
Nome do modelo: Carcaça Redutor - POM sem carga
 Nome do estudo: Estático POM sem carga
 Tipo de plotagem: Deformação estática Deformação1
 Escala de distorção: 9.66565



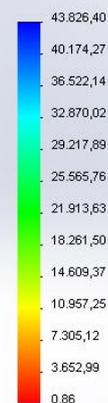
ESTRN



Nome do modelo: Carcaça Redutor - POM sem carga
 Nome do estudo: Estático POM sem carga
 Tipo de plotagem: Fator de segurança Fator de segurança1
 Critério: Automático
 Distribuição do fator de segurança: Min. FOS = 0.86

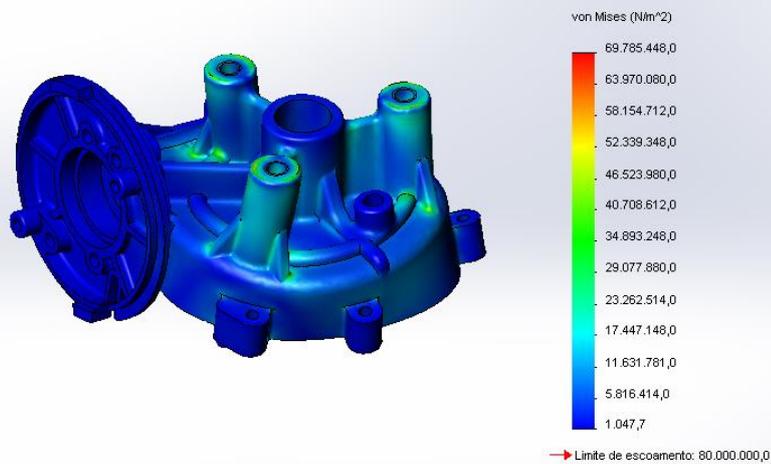


FOS

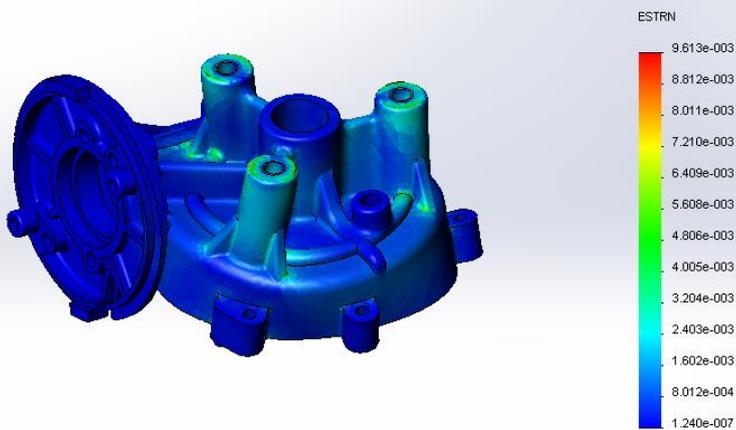


APÊNDICE 3 - RESULTADO DAS TENSÕES DO POM FV30

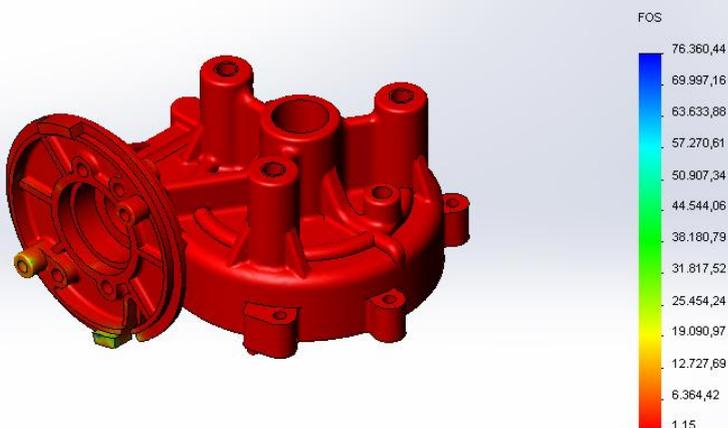
Nome do modelo: Carcaça Redutor - POMFV30
 Nome do estudo: Estático POM FV30
 Tipo de plotagem: Estático tensão nodal Tensão1
 Escala de distorção: 28.1778



Nome do modelo: Carcaça Redutor - POMFV30
 Nome do estudo: Estático POM FV30
 Tipo de plotagem: Deformação estática Deformação1
 Escala de distorção: 28.1778

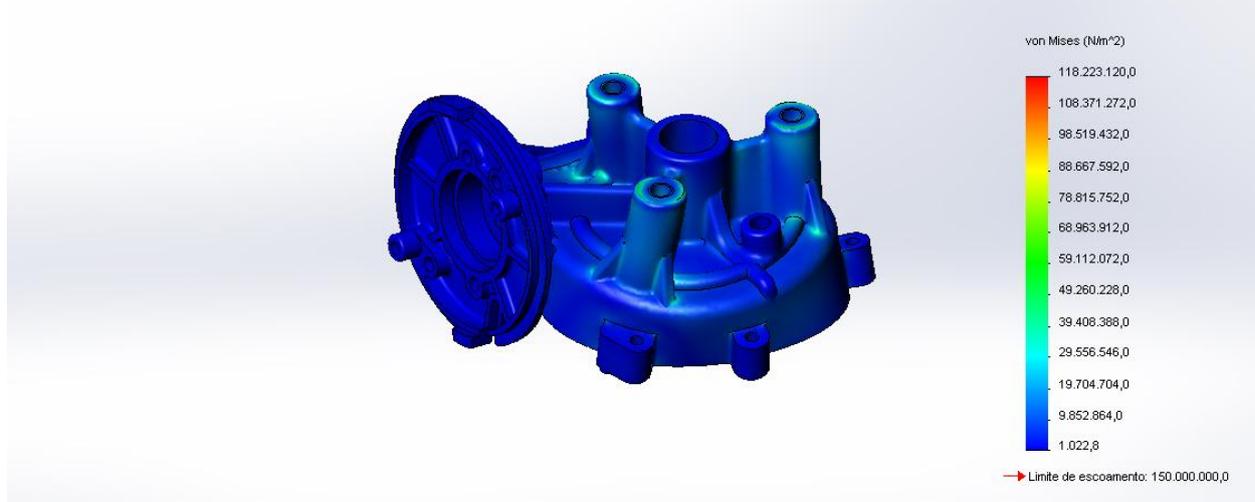


Nome do modelo: Carcaça Redutor - POMFV30
 Nome do estudo: Estático POM FV30
 Tipo de plotagem: Fator de segurança Fator de segurança1
 Critério: Automático
 Distribuição do fator de segurança: Mín. FOS = 1.1

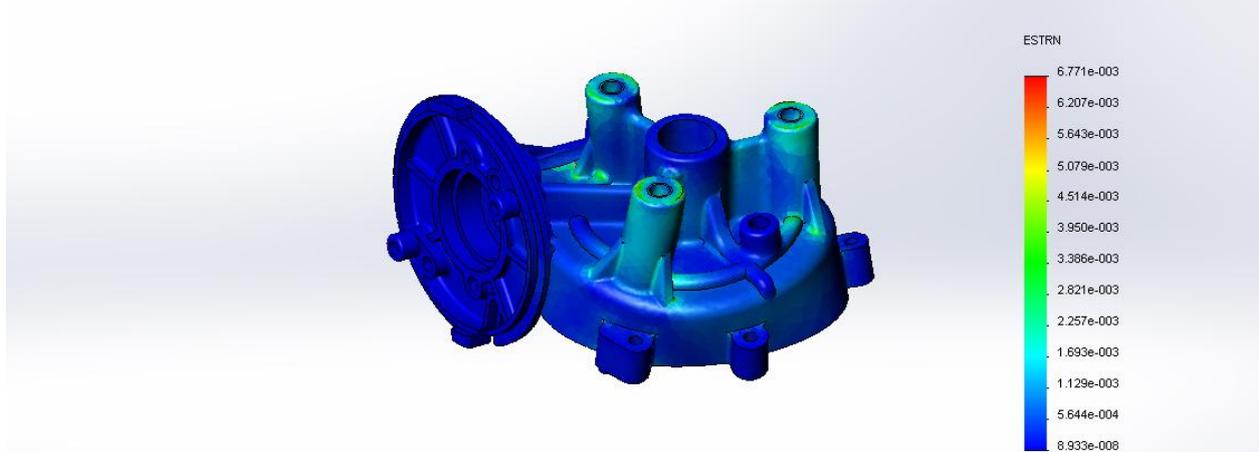


APÊNDICE 4 - RESULTADO DAS TENSÕES DO PA66 FV33

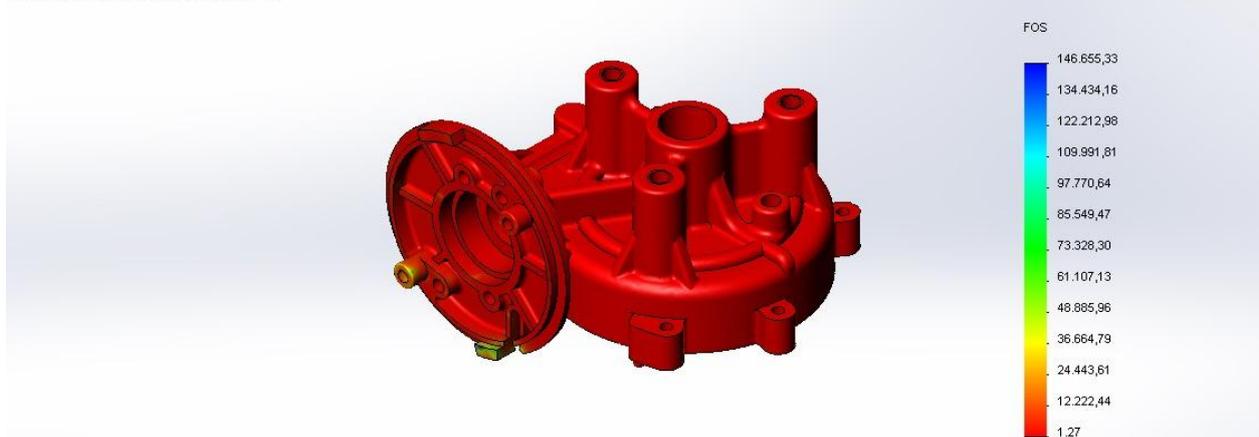
Nome do modelo: Carcaça Redutor - PA66FV33
 Nome do estudo: Estático PA66 FV33
 Tipo de plotagem: Estático tensão nodal Tensão1
 Escala de distorção: 38.2567



Nome do modelo: Carcaça Redutor - PA66FV33
 Nome do estudo: Estático PA66 FV33
 Tipo de plotagem: Deformação estática Deformação1
 Escala de distorção: 38.2567

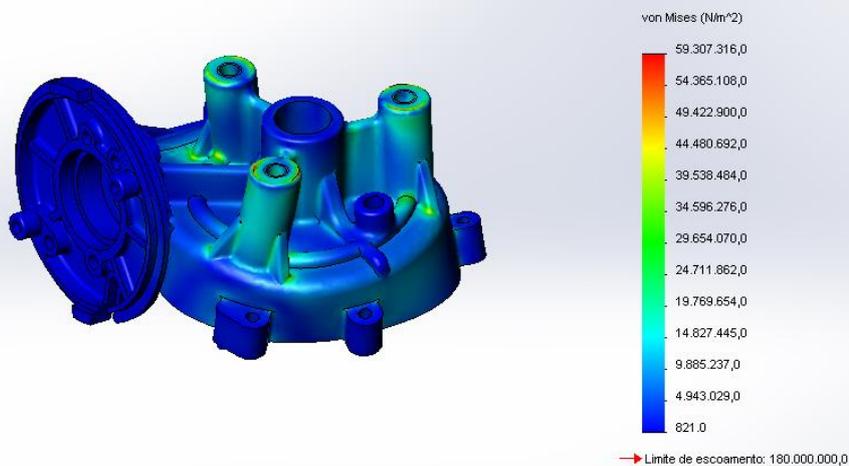


Nome do modelo: Carcaça Redutor - PA66FV33
 Nome do estudo: Estático PA66 FV33
 Tipo de plotagem: Fator de segurança Fator de segurança1
 Critério: Automático
 Distribuição do fator de segurança: Mín. FOS = 1.3

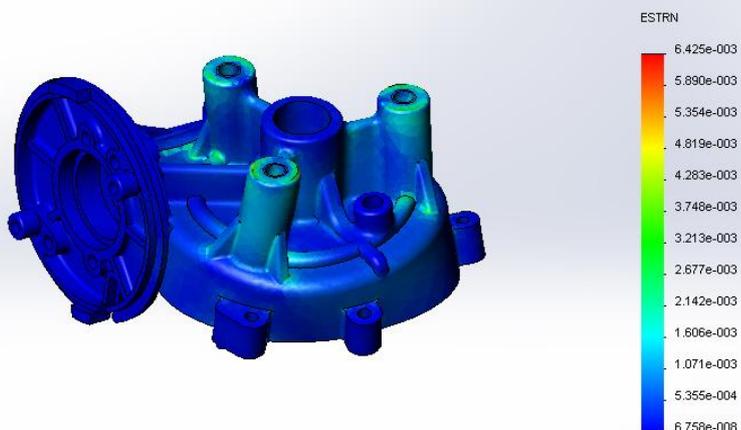


APÊNDICE 5 - RESULTADO DAS TENSÕES DO PPA FV30

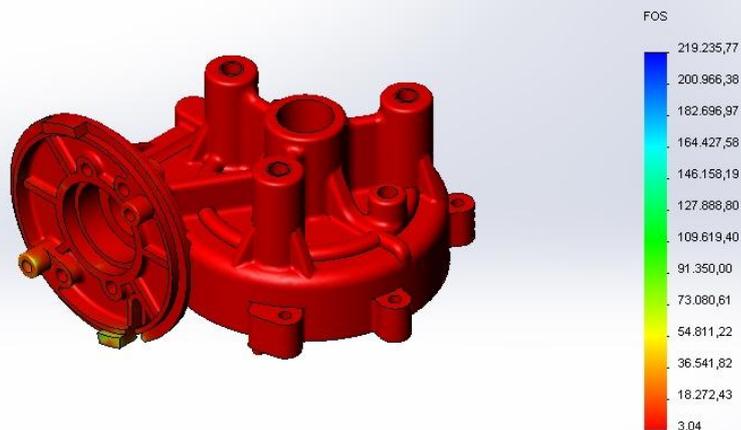
Nome do modelo: Carcaça Redutor - PPAFV30
 Nome do estudo: Estático PPA FV30
 Tipo de plotagem: Estático tensão nodal Tensão1
 Escala de distorção: 45,0859



Nome do modelo: Carcaça Redutor - PPAFV30
 Nome do estudo: Estático PPA FV30
 Tipo de plotagem: Deformação estática Deformação1
 Escala de distorção: 45,0859



Nome do modelo: Carcaça Redutor - PPAFV30
 Nome do estudo: Estático PPA FV30
 Tipo de plotagem: Fator de segurança Fator de segurança1
 Critério: Automático
 Distribuição do fator de segurança: Mín. FOS = 3



APÊNDICE 6 - PREVISÃO DE RECEITA

| PRODUT O CARC. PQ | JAN | FEV | MAR | ABRIL | MAIO | JUN | JUL | AGO | SET | OUT | NOV | DEZ | TOTAL |
|----------------------------------|---------------------|---------------------|----------------------|----------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|----------------------|---------------------|--------------------------------|
| QUANT. | 1030 | 1360 | 1960 | 2180 | 1470 | 1235 | 1515 | 1140 | 1640 | 1500 | 1945 | 1360 | 18335 |
| PREÇO VENDA | R\$ 5,56 | R\$ 5,56 | R\$ 5,56 | R\$ 5,56 | R\$ 5,56 | R\$ 5,56 | R\$ 5,56 | R\$ 5,56 | R\$ 5,56 | R\$ 5,56 | R\$ 5,56 | R\$ 5,56 | R\$ 66,72 |
| RECEITA | R\$ 5.726,6 4 | R\$ 7.561,3 9 | R\$ 10.897,3 0 | R\$ 12.120,4 6 | R\$ 8.172,9 7 | R\$ 6.866,4 1 | R\$ 8.423,1 7 | R\$ 6.338,2 2 | R\$ 9.118,1 5 | R\$ 8.339,7 7 | R\$ 10.813,9 0 | R\$ 7.561,3 9 | R\$ 101.939,7 7 |

APÊNDICE 7 - PROJEÇÃO DE CUSTOS VARIÁVEIS DO PROJETO

| CUSTO VARIÁVEIS | JANEIRO | FEVEREIRO | MARÇO | ABRIL | MAIO | JUNHO | JULHO | AGOSTO | SETEMBRO | OUTUBRO | NOVEMBRO | DEZEMBRO | TOTAL |
|-------------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|----------------------|
| Matéria prima PQ | R\$ 103,00 | R\$ 136,00 | R\$ 196,00 | R\$ 218,00 | R\$ 147,00 | R\$ 123,50 | R\$ 151,50 | R\$ 114,00 | R\$ 164,00 | R\$ 150,00 | R\$ 194,50 | R\$ 136,00 | R\$ 1.833,50 |
| Hora Homem | R\$ 1.300,00 | R\$ 15.600,00 |
| Hora máquina | R\$ 2.188,67 | R\$ 26.264,05 |
| TOTAL | R\$ 3.591,67 | R\$ 3.624,67 | R\$ 3.684,67 | R\$ 3.706,67 | R\$ 3.635,67 | R\$ 3.612,17 | R\$ 3.640,17 | R\$ 3.602,67 | R\$ 3.652,67 | R\$ 3.638,67 | R\$ 3.683,17 | R\$ 3.624,67 | R\$ 43.697,55 |

APÊNDICE 8 - FLUXO DE CAIXA PROJETADO

| | JANEIRO | FEVEREIRO | MARÇO | ABRIL | MAIO | JUNHO | JULHO | AGOSTO | SETEMBRO | OUTUBRO | NOVEMBRO | DEZEMBRO |
|-------------------------|-------------------------|-------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| RECEITA | R\$ 5.726,64 | R\$ 7.561,39 | R\$ 10.897,30 | R\$ 12.120,46 | R\$ 8.172,97 | R\$ 6.866,41 | R\$ 8.423,17 | R\$ 6.338,22 | R\$ 9.118,15 | R\$ 8.339,77 | R\$ 10.813,90 | R\$ 7.561,39 |
| GASTOS VARIÁVEIS | R\$ 3.591,67 | R\$ 3.624,67 | R\$ 3.684,67 | R\$ 3.706,67 | R\$ 3.635,67 | R\$ 3.612,17 | R\$ 3.640,17 | R\$ 3.602,67 | R\$ 3.652,67 | R\$ 3.638,67 | R\$ 3.683,17 | R\$ 3.624,67 |
| RESULTADO | R\$ 2.134,97 | R\$ 3.936,72 | R\$ 7.212,63 | R\$ 8.413,79 | R\$ 4.537,30 | R\$ 3.254,24 | R\$ 4.783,00 | R\$ 2.735,55 | R\$ 5.465,48 | R\$ 4.701,10 | R\$ 7.130,73 | R\$ 3.936,72 |
| SALDO | R\$ 2.134,97 | R\$ 6.071,69 | R\$ 13.284,32 | R\$ 21.698,11 | R\$ 26.235,41 | R\$ 29.489,65 | R\$ 34.272,65 | R\$ 37.008,20 | R\$ 42.473,68 | R\$ 47.174,77 | R\$ 54.305,50 | R\$ 58.242,22 |

APÊNDICE 9 - ÍNDICES DE VIABILIDADE ECONOMICA

| i | 1,08% | Mês | |
|-------|-----------------|-----------------|-------|
| Meses | Capitais | Acumulado | PBS = |
| 0 | R\$ (47.008,00) | R\$ (47.008,00) | --- |
| 1 | R\$ - | R\$ (47.008,00) | |
| 2 | R\$ 3.936,72 | R\$ (43.071,28) | |
| 3 | R\$ 7.212,63 | R\$ (35.858,65) | |
| 4 | R\$ 8.413,79 | R\$ (27.444,86) | |
| 5 | R\$ 4.537,30 | R\$ (22.907,56) | |
| 6 | R\$ 3.254,24 | R\$ (19.653,32) | |
| 7 | R\$ 4.783,00 | R\$ (14.870,32) | |
| 8 | R\$ 2.735,55 | R\$ (12.134,77) | |
| 9 | R\$ 5.465,48 | R\$ (6.669,29) | |
| 10 | R\$ 4.701,10 | R\$ (1.968,20) | |
| 11 | R\$ 7.130,73 | R\$ 5.162,53 | 10,28 |
| 12 | R\$ 3.936,72 | R\$ 9.099,25 | |
| | PBS = | 10,28 | |
| Meses | Capitais | Acumulado | PBD = |
| 0 | R\$ (47.008,00) | R\$ (47.008,00) | --- |
| 1 | R\$ - | R\$ (47.008,00) | |
| 2 | R\$ 3.936,72 | R\$ (43.155,18) | |
| 3 | R\$ 7.212,63 | R\$ (36.171,91) | |
| 4 | R\$ 8.413,79 | R\$ (28.112,94) | |
| 5 | R\$ 4.537,30 | R\$ (23.813,55) | |
| 6 | R\$ 3.254,24 | R\$ (20.762,98) | |
| 7 | R\$ 4.783,00 | R\$ (16.327,38) | |
| 8 | R\$ 2.735,55 | R\$ (13.817,69) | |
| 9 | R\$ 5.465,48 | R\$ (8.857,19) | |
| 10 | R\$ 4.701,10 | R\$ (4.636,16) | |
| 11 | R\$ 7.130,73 | R\$ 1.697,78 | 10,73 |
| 12 | R\$ 3.936,72 | R\$ 5.157,15 | |
| | PBD = | 10,73 | |

| | | |
|--------------|--------------|---------------|
| Tx Livre | 0,60% | ao mês |
| Risco | 0,48% | ao mês |
| Prêmio | 0% | ao mês |
| TOTAL | 1,08% | ao mês |

| Valor Presente Líquido | | |
|-------------------------|-----------------|---------------------|
| Meses | Capitais | VP |
| 0 | R\$ (47.008,00) | R\$ (47.008,00) |
| 1 | R\$ - | R\$ - |
| 2 | R\$ 3.936,72 | R\$ 3.852,82 |
| 3 | R\$ 7.212,63 | R\$ 6.983,27 |
| 4 | R\$ 8.413,79 | R\$ 8.058,97 |
| 5 | R\$ 4.537,30 | R\$ 4.299,39 |
| 6 | R\$ 3.254,24 | R\$ 3.050,57 |
| 7 | R\$ 4.783,00 | R\$ 4.435,61 |
| 8 | R\$ 2.735,55 | R\$ 2.509,69 |
| 9 | R\$ 5.465,48 | R\$ 4.960,49 |
| 10 | R\$ 4.701,10 | R\$ 4.221,03 |
| 11 | R\$ 7.130,73 | R\$ 6.333,95 |
| 12 | R\$ 3.936,72 | R\$ 3.459,37 |
| | VPL = | R\$ 5.157,15 |
| Taxa Interna de Retorno | | |
| Meses | Capitais | |
| 0 | R\$ (47.008,00) | |
| 1 | R\$ - | |
| 2 | R\$ 3.936,72 | |
| 3 | R\$ 7.212,63 | |
| 4 | R\$ 8.413,79 | |
| 5 | R\$ 4.537,30 | |
| 6 | R\$ 3.254,24 | |
| 7 | R\$ 4.783,00 | |
| 8 | R\$ 2.735,55 | |
| 9 | R\$ 5.465,48 | |
| 10 | R\$ 4.701,10 | |
| 11 | R\$ 7.130,73 | |
| 12 | R\$ 3.936,72 | |
| | TIR = | 2,68% |

| Valor Futuro Líquido | | |
|-------------------------|-----------------|---------------------|
| Meses | Capitais | VP |
| 0 | R\$ (47.008,00) | R\$ (47.008,00) |
| 1 | R\$ - | R\$ - |
| 2 | R\$ 3.936,72 | R\$ 3.852,82 |
| 3 | R\$ 7.212,63 | R\$ 6.983,27 |
| 4 | R\$ 8.413,79 | R\$ 8.058,97 |
| 5 | R\$ 4.537,30 | R\$ 4.299,39 |
| 6 | R\$ 3.254,24 | R\$ 3.050,57 |
| 7 | R\$ 4.783,00 | R\$ 4.435,61 |
| 8 | R\$ 2.735,55 | R\$ 2.509,69 |
| 9 | R\$ 5.465,48 | R\$ 4.960,49 |
| 10 | R\$ 4.701,10 | R\$ 4.221,03 |
| 11 | R\$ 7.130,73 | R\$ 6.333,95 |
| 12 | R\$ 3.936,72 | R\$ 3.459,37 |
| | VFL = | R\$ 5.868,78 |
| Valor Uniforme Líquido | | |
| | VUL = | R\$ 460,61 |
| Índice de Lucratividade | | |
| | IL = | 1,11 |

ANEXOS

ANEXO 2 - FICHA TÉCNICA DO PA66 FV33
PEPASA - POLÍMEROS DE ENGENHARIA S/A
FICHA TÉCNICA

EP nº : 211-1663

DATA DA EDIÇÃO: 21/11/2012
 SUBSTITUI EP nº: 211-1104

TIPO: RF - 1066 - NATURAL

DESCRIÇÃO: Nylon 6.6 c/ 33% de fibra de vidro, cor natural.

| PROPRIEDADES | NORMA | UNIDADE | VALORES |
|--|------------|---------|-------------|
| Peso Específico | ASTM D792 | – | 1,37 ± 0,02 |
| Absorção de Umidade em 24 horas | ASTM D570 | % | 0,70 - 1,10 |
| Contração na Moldagem | ASTM D955 | % | 0,30 - 0,50 |
| Teor de Reforço/Carga | IT 8.2.4.4 | % | 33 ± 3 |
| Resistência à Tração no Escoamento | ASTM D638 | MPa | ≥ 150,0 |
| Alongamento à Tração na Ruptura | ASTM D638 | % | ≥ 2,0 |
| Resistência à Flexão | ASTM D790 | MPa | ≥ 250,0 |
| Módulo de Flexão | ASTM D790 | MPa | ~ 9.500 |
| Resistência ao Impacto Izod, com entalhe | ASTM D256 | J/M | ≥ 90,0 |
| Flamabilidade | UL94 | – | HB |
| Temperatura de Deflexão | ASTM D648 | °C | ~ 250 |
| 0,45 MPa | | | ~ 245 |
| 1,82 MPa | | | |

Testes feitos com corpos de prova secos como moldados.

As informações acima são baseadas em nossa experiência até a presente data e cremos serem confiáveis. São porém fornecidas como um simples guia, para uso a critério do Cliente.

APROVADO POR:

211-1663.xls

ANEXO 3 - FICHA TÉCNICA DO POM FV30

PEPASA - POLÍMEROS DE ENGENHARIA S/A
FICHA TÉCNICA

EP nº : 203-1050

DATA DA EDIÇÃO: 28/10/02

SUBSTITUI EP

nº:

TIPO: KF-1006-BK

DESCRIÇÃO: Poliacetal copolímero, reforçado com 30% de fibra de vidro,
na cor preta

| PROPRIEDADES | NORMA | UNIDADE | VALORES |
|--|--------------|---------|-------------|
| Peso Específico | ASTM D792 | – | 1,63 ± 0,02 |
| Absorção de Umidade em 24 horas | ASTM D570 | % | 0,50 - 0,70 |
| Contração na Moldagem | ASTM D955 | % | 0,50 - 1,70 |
| Teor de Reforço/Carga | IT 8.2.4.4 | % | ≥ 30 ± 3,0 |
| Resistência à Tração no Escoamento | ASTM D638 | MPa | ≥ 80,0 |
| Alongamento à Tração na Ruptura | ASTM D638 | % | ≥ 1,20 |
| Resistência à Flexão | ASTM D790 | MPa | ≥ 120,0 |
| Módulo de Flexão | ASTM D790 | MPa | ~ 7.000 |
| Resistência ao Impacto Izod, com entalhe | ASTM D256 | J/M | ≥ 45,0 |
| Flamabilidade | UL94 | – | HB |
| Temperatura de Deflexão | ASTM D648 | °C | ~ 165 |
| 0,45 MPa 1,82 MPa | | | ~150 |

Testes feitos com corpos de prova secos como moldados.

As informações acima são baseadas em nossa experiência até a presente data e cremos serem confiáveis. São porém fornecidas como um simples guia, para uso a critério do Cliente.

APROVADO POR:

203-1050.xls

ANEXO 4 - FICHA TÉCNICA DO POM SEM CARGA
PEPASA - POLÍMEROS DE ENGENHARIA S/A
FICHA TÉCNICA

EP nº : 203-1036

DATA DA EDIÇÃO: 05/04/2000
 SUBSTITUI EP nº: 203-1032

TIPO: K - 1000 - BK / 90

DESCRIÇÃO: Poliacetal Copolímero na cor preta.

| PROPRIEDADES | NORMA | UNIDADE | VALORES |
|---|---------------|-------------|----------------|
| Peso Específico | ASTM D792 | - | 1,41 ± 0,02 |
| Absorção de Umidade em 24 horas | ASTM D570 | % | 0,20 - 0,22 |
| Contração na Moldagem | ASTM D955 | % | 1,80 - 2,50 |
| Teor de Reforço/Carga | IT 8.2.4.4 | % | 0 |
| Resistência à Tração no Escoamento | ASTM D638 | MPa | ≥ 50,0 |
| Alongamento à Tração na Ruptura | ASTM D638 | % | ≥ 40,0 |
| Resistência à Flexão | ASTM D790 | MPa | ≥ 80,0 |
| Módulo de Flexão | ASTM D790 | MPa | ~ 2.400 |
| Resistência ao Impacto Izod, com entalhe | ASTM D256 | J/M | ≥ 50,0 |
| Índice de Fluidez | ASTM D1238 | g / 10 min. | 8 a 12 |
| Flamabilidade | UL94 | - | HB |
| Temperatura de Deflexão 0,45 MPa 1,82 MPa | ASTM D648 | °C | ~ 158 ~ 100 |

Testes feitos com corpos de prova secos como moldados.

As informações acima são baseadas em nossa experiência até a presente data e cremos serem confiáveis. São porém fornecidas como um simples guia, para uso a critério do Cliente.

APROVADO POR:

ANEXO 5 - FICHA TÉCNICA DO PPA FV30



Product Information

VESTAMID® HTplus M1033

Glass-fiber reinforced polyphthalamide compound for injection molding

VESTAMID HTplus M1033 is a glass-fiber reinforced (30%), heat-stabilized polyphthalamide compound (PPA) for injection molding.

This compound is especially suitable for manufacturing parts subjected to high temperature.

VESTAMID HTplus M1033 is supplied as cylindrical pellets in polyethylene packaging.

Drying at 120°C for at least 4 hours before processing is recommended.

For information about processing of VESTAMID HTplus M1033, please follow the general recommendations for PPA in our information „Handling and Processing of VESTAMID HTplus.“

For further information, please contact our experts in the department Market Development of the High Performance Polymers Business Line.

| Property | Test method | | Unit | VESTAMID HTplus M1033 | |
|--------------------------------|-------------------------|-------------|--------------------|-----------------------|--------------------|
| | international | national | | | |
| Density | 23°C | ISO 1183 | DIN EN ISO 1183 | g/cm ³ | 1.44 |
| Tensile test | | ISO 527-1 | DIN EN ISO 527-1 | | |
| Stress at break | | ISO 527-2 | DIN EN ISO 527-2 | MPa | 180 |
| Strain at break | | | | % | 2 |
| Tensile modulus | | ISO 527-1 | DIN EN ISO 527-1 | MPa | 11200 |
| | | ISO 527-2 | DIN EN ISO 527-2 | | |
| Flexural test | | ISO 178 | DIN EN ISO 178 | | |
| Flexural strength | | | | MPa | 260 |
| Flexural modulus | | ISO 178 | DIN EN ISO 178 | MPa | 10000 |
| CHARPY impact strength | | ISO 179/1eU | DIN EN ISO 179/1eU | | |
| | 23°C | | | kJ/m ² | 45 C ¹⁾ |
| | -40°C | | | kJ/m ² | 40 C ¹⁾ |
| CHARPY notched impact strength | | ISO 179/1eA | DIN EN ISO 179/1eA | | |
| | 23°C | | | kJ/m ² | 7 C ¹⁾ |
| | -40°C | | | kJ/m ² | 7 C ¹⁾ |
| Vicat softening temperature | | ISO 306 | DIN EN ISO 306 | | |
| Method A | 10 N | | | °C | 313 |
| Method B | 50 N | | | °C | 284 |
| Melting range | | ISO 11357 | | | |
| DSC | 2 nd heating | | | °C | 300-315 |

Pigmentation may affect values.

¹⁾ C = Complete break, incl. hinge break H

The results shown have been generated from a low number of production lots. Therefore, they are preliminary and not yet the result of a statistical evaluation. Therefore they must not be used to establish specifications.