# MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

# ANÁLISE POR ELEMENTOS FINITOS DE UMA BOMBA CENTRÍFUGA FABRICADA EM POLIOXIMETILENO

por

Vinicius Puntel Fortes

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Mecânica da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Engenheiro Mecânico.

Porto Alegre, Dezembro de 2012



# Universidade Federal do Rio Grande do Sul Escola de Engenharia Departamento de Engenharia Mecânica

# ANÁLISE POR ELEMENTOS FINITOS DE UMA BOMBA CENTRÍFUGA FABRICADA EM POLIOXIMETILENO

por

Vinicius Puntel Fortes

ESTA MONOGRAFIA FOI JULGADA ADEQUADA COMO PARTE DOS REQUISITOS PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE **ENGENHEIRO MECÂNICO** 

APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELA BANCA EXAMINADORA DO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Prof. Dr. Arnaldo Ruben Gonzalez Coordenador do Curso de Engenharia Mecânica

Área de Concentração: Mecânica dos Sólidos

Orientador: Prof. Jakson Manfredini Vassoler

Comissão de Avaliação:

Prof. Dr. Rogério José Marczak

Prof. Dr. Herbert Martin Gomes

Prof. Dr. Walter Jesus Paucar Casas

Porto Alegre, 03 de Dezembro de 2012

#### **AGRADECIMENTOS**

Agradeço aos meus pais Renato e Simone, as minhas irmãs pelo apoio que me deram durante toda a minha vida, assim como pelos ensinamentos transmitidos. Agradeço também a todos os meus amigos que estiveram comigo ao longo destes seis anos, é um privilégio quando temos ao nosso lado pessoas maravilhosas como vocês. Obrigado pela força, pela amizade e pela compreensão. Agradeço aos donos da Retificadora Travicar Ltda, que sempre deram o apoio necessário para a realização do presente trabalho. Ao meu orientador Prof. Dr. Jakson Manfredini Vassoler, pelo suporte, idéias, paciência e dicas sempre oferecidos. Agadeço à UFRGS e aos professores da Engenharia Mecânica pelos ensinamentos e oportunidade de crescimento dados ao longo dos anos.

FORTES, V.P. Análise por Elementos Finitos de uma Bomba Centrífuga Fabricada em Polioximetileno. 2012. 18 folhas. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2012.

#### **RESUMO**

Apesar de bastante presente em todo o mundo, a tecnologia de aviação aero agrícola não tem geralmente as mesmas inovações tecnológicas que os outros ramos da indústria. O sistema de pulverização do avião consiste em uma turbina eólica acoplada a uma bomba centrífuga. O presente trabalho apresenta um estudo para análise de uma bomba centrífuga previamente fabricada em polioximetileno, com o intuito de verificar a integridade do componente polimérico quando submetido às condições de contorno de operação. Foram estudados alguns modelos constitutivos para a simulação do comportamento do material, alguns destes levando em conta os efeitos de não-linearidade do material através de curvas que foram obtidas experimentalmente. Os resultados das simulações numéricas são apresentados e discutidos, e conclui-se que frente às condições de contorno de operação, a bomba resiste aos esforços em todos modelos utilizados, embora apenas um dos modelo seja capaz de representar adequadamente os dados experimentais disponíveis.

**PALAVRAS-CHAVE:** aviação agrícola, método dos elementos finitos, polioximetileno, modelo hiperelástico.

FORTES, V.P. Finite Element Analysis of a Centrifugal Pump Casing made of Polyoxymethylene. 2012. 18 folhas. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2012.

#### **ABSTRACT**

Despite being used all over the world, aerial application doesn't usually share the same technological innovations like other industries. The spraying system consists of a wind turbine and a centrifugal pump. The present work presents a methodology to analyze a previously made centrifugal pump casing made of polyoxymethylene, aiming to verify its integrity when under the usual operation boundary conditions. Some numeric models were presented for simulating the material's behaviour, some of those even taking into account the materials non-linearity by considering come experimental curves obtained in this work. Results of the simulations are presented and discussed, concluding that the casing resists the usual operation stresses and supports according to all the presented models, despite only one of those models could incorporate the material's real behavior.

**KEYWORDS**: aerial application, finite element method, polyoxymethylene, hyperelastic modelling.

# ÍNDICE

1.	INTRODUÇÃO	1	
2.	OBJETIVOS	1	
3.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	2	
3.1.	Máquinas de Fluido	2	
3.2.	Polímeros	2	
3.3.	Polioximetileno	2	
4.	DESCRIÇÃO DO PROBLEMA	5	
4.1.	Comportamento Mecânico do POM	5	
4.2.	Modelagem	6	
4.3.	Condições de Contorno	6	
5.	METODOLOGIA	7	
5.1.	Modelo Isotrópico Linear	8	
5.2	Testes Experimentais	8	
5.3.	Modelo Hiperelástico	9	
5.4.	Modelo Multilinear Elástico	10	
5.5.	Série de Prony	11	
6.	RESULTADOS E DISCUSSÃO	11	
6.1.	Modelo Isotrópico Linear	11	
6.2.	Modelo Hiperelástico	11	
6.3.	Modelo Multilinear Elástico	12	
7.	CONCLUSÕES	13	
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS		14	
Apênd	estes Experimentais		
Apênd	dice II	17	
Apêndice III			
Apênd	dice IV	19	

## 1. INTRODUÇÃO

Desde os anos 50 se utilizam plásticos na fabricação de diferentes elementos das bombas centrífugas, porém, este processo avança de forma relativamente lenta uma vez que as propriedades físicas e mecânicas destes materiais nem sempre respondem às exigências de diversos elementos de máquinas e, por vezes, dependem do tempo de ação das cargas.

O uso destes materiais em componentes estruturais possui diversas dificuldades devido a sua resposta mecânica frente às solicitações envolvidas. Estes possuem comportamento não linear, viscoelástico e viscoplástico, pondendo alcançar grandes deformações em zona elástica e ainda apresentar fenômeno de dano mecânico [Ward, 2006]. A sua aplicação geralmente é limitado a temperaturas relativamente baixas e consequentemente com velocidades de rotação também mais baixas [Ward, 2006; Rubstein, 2003]. São utilizados nestas aplicações, mais comumente o PVC, o PVC Clorado, o Polietileno (PE) e o Poliestireno (PS) [Loon, 2005].

Os materiais com os quais se fabricam as carcaças das bombas incidem consideravelmente em seu custo, portanto no projeto de bombas centrífugas deve ser encontrado o equilíbrio para a questão resistência à corrosão desejada x orçamento disponível para se escolher o material mais adequado, assegurando-se que as outras propriedades do material escolhido suprem as necessidades de projeto.

A aviação aero agrícola existe no mundo desde 1921 e consiste basicamente na aplicação de fertilizantes, pesticidas e fungicidas em lavouras utilizando um avião agrícola. Embora o ramo seja de particular interesse econômico, há poucos investimentos em tecnologia e pouquíssimos estudos da tecnologia já existente. No escopo de tecnologia de aviação aero agrícola existem poucas opções de materias de fabricação de bombas, pois o fluido que passa pelo componente é basicamente formado por inseticidas e pesticidas em forte concentração, havendo um meio extremamente agressivo em contato com os componentes internos da bomba. Este fator delimita a escolha dos materiais para os aços inoxidáveis, os quais perderam a sua reatividade e se tornaram inertes devido a uma forte camada passivante presente pelas altas quantidades de cromo e níquel em sua composição, e para os plásticos, que não estão sujeitos à corrosão ou oxidação, mas somente à degradação.

Outros dois fatores muito significantes na seleção de materiais para a fabricação de bombas em aviação agrícola são o custo do material e o seu peso; todos os componentes em aviação em geral têm o seu peso otimizado para a aeronave possuir o menor peso possível, e que, com isto, tenha também mais agilidade e autonomia em voo.

Fazendo uma breve análise das condições de projeto e de bombas de plástico atualmente fabricadas, pode-se constatar que o plástico preenche todos os requisitos de projeto de bombas centrífugas para aviação agrícola, se sobressaindo na maioria daqueles, uma vez que o plástico é muito mais leve que o aço inoxidável, assim como consideravelmente mais barato – contabilizando-se os custos de matéria prima e de fabricação.

A análise estrutural de uma bomba centrífuga, por si só, envolve diferentes aspectos de resistência de materiais, mecânica dos fluidos, máquinas de fluxo, dinâmica de rotores, entre outros, que estão interligados, necessitando de um estudo que envolve várias áreas da engenharia mecânica. Assim, este é um estudo de grande complexibilidade. A utilização de materiais poliméricos em suas peças adiciona um fator de dificuldade ainda maior, necessitando um estudo adequado.

#### 2. OBJETIVOS

O presente trabalho tem por objetivo a análise estrutural pelo método dos elementos finitos de uma bomba centrífuga já existente com o fim de averiguar a integridade dos componentes poliméricos usados em sua fabricação. A bomba em estudo é formada por duas peças fabricadas com polioximetileno, a carcaça e o corpo da bomba. Sendo que o uso de polímeros no projeto mecânico de estruturas necessita de uma metodologia diferente das comumente utilizadas para materiais metálicos. Neste trabalho, será dada ênfase ao estudo do comportamento mecânico do material polimérico na sua simulação numérica, a fim de avaliar a

capacidade do polioximetileno de resistir aos esforços mecânicos em condições de operação durante a pulverização aérea.

#### 3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 3.1. Máquinas de fluido

Segundo Henn, 2012, uma máquina de fluido é o equipamento que promove a troca de energia entre um sistema e um fluido, no caso transformando energia mecânica em energia de fluido se se tratar de uma máquina de fluido geradora. As máquinas de fluido são geralmente subdivididas em dois tipos principais: as máquinas de deslocamento positivo e as máquinas de fluxo. No primeiro caso o fluido encontra-se confinado durante sua passagem através da máquina e no segundo caso o fluido não se encontra em momento algum confinado, mas sim em um fluxo contínuo através da máquina, submetido a trocas de energia devido a efeitos dinâmicos. A denominação bomba é dada às máquinas de fluido geradoras que trabalham com líquido.

Loeser, 2011, define que este aumento de energia do fluido pode referir-se a três formas de energia:

- Potencial ou de posição;
- Cinética ou de velocidade;
- Entálpica, composta de energia de pressão e de temperatura.

O aumento da energia de pressão somente pode ser feito através da centrifugação, diferenciando então dois tipos de bombas:

- Bombas volumétricas, que não aumentam a pressão, apenas movimentam o fluido aumentando sua energia de posição e cinética. Dividem-se em alternativas ou rotativas conforme o tipo de acionamento: máquina alternativa (pistão) ou rotativa (engrenagens ou lóbulos):
- Bombas centrífugas, que aumentam a energia de pressão, primeiro por meio do aumento de velocidade a qual é convertida em pressão e sempre com acionamento por máquina rotativa;

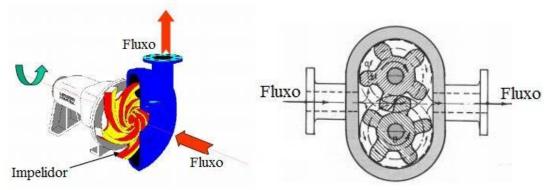


Figura 3.1 – Funcionamento das bombas tipo volumétrica e centrífuga.

A bomba centrífuga possui uma construção básica composta por três partes: carcaça ou conjunto carcaça e corpo da bomba, impelidor<sup>1</sup> e eixo. Impelidor é um disco com pás radiais, que têm como objetivo mudar o curso do fluido que entra na máquina de fluxo, centrifugando-o.

\_

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Na linguagem usual, para a peça do impelidor, também é usado o termo rotor. Neste trabalho, foi evitado utilizar este termo, pois pode gerar confusões com o termo em inglês rotor, cujo significado é conjunto girante e engloba além do próprio impelidor, também eixo e todos os componentes que giram em uma bomba centrífuga.

O fluido centrifugado pelo impelidor é coletado pela carcaça. O impelidor é conectado a um eixo, o qual é suportado por dois mancais.

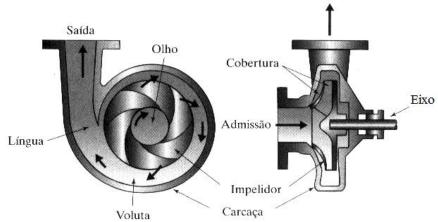


Figura 3.2 – Esquematização de uma bomba centrífuga.

Entre os diferentes critérios que podem ser usados para classificar as bombas centrífugas, podem se citar o seguinte:

 Fluxo radial, misto ou axial, conforme o ângulo de saída do líquido com relação ao eixo da bomba;

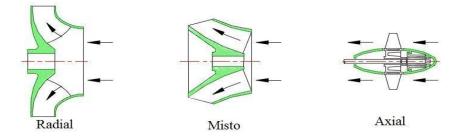


Figura 3.3 – Tipos de fluxo.

 Em balanço ou entre mancais, conforme a posição do impelidor em relação ao corpo do mancal: em balanço quando o impelidor está em uma das extremidades do eixo e entre mancais quando o impelidor situa-se entre os dois mancais;

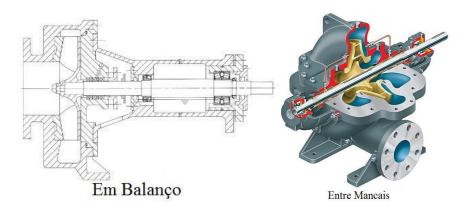


Figura 3.4 – Configuração dos mancais.

Vale ressaltar que as normas HIS [Hydraulic Institute Standards, 2008] e API610 [American Petroleum Institute, 2010] para bombas centrífugas não mencionam o uso de matéria prima plástica para a produção da carcaça das bombas centrífugas. Entretanto, foi encontrado um

fornecedor americano de bombas centrífugas feitas em termoplástico [Finish Thompson, 2012], que fornece vários modelos de bombas para uso contínuo de mais de 2 anos, submetidos a pressões e temperaturas de operação até 50% maiores dos que as do presente trabalho. O material utilizado por tais fornecedores possuem propriedades mecânicas inferiores ou iguais às do polioximetileno, portanto espera-se que o componente provavelmente atenda aos requisitos mínimos de operação.

#### 3.2. Polímeros

Segundo Callister, 2011, os polímeros incluem os materiais comuns de plástico e borracha que conhecemos. São compostos orgânicos resultantes de reações químicas de polimerização. O uso de materias poliméricos vem aumentando aceleradamente desde a Segunda Guerra Mundial, quando o campo dos materiais foi revolucionado pelo advento dos polímeros sintéticos. Os materiais sintéticos podem ser produzidos a baixos custos, e suas propriedades podem ser administradas a um nível em que a maioria deles é muito superior aos seus análogos naturais. Os polímeros de engenharia podem chegar a suportar tensões muito superiores às dos aços, como também meios muito mais agressivos, portanto em diversas aplicações, as peças metálicos e de madeira foram substituídas por peças feitas em plástico, que possuem propriedades satisfatórias e podem ser produzidas a custos mais baixos.

As moléculas nos polímeros são gigantescas quando comparadas às de outros materiais; devido aos seus tamanhos, elas são chamadas de macromoléculas [Callister, 2011]. Dentro de cada molécula, os átomos estão ligados uns aos outros por ligações interatômicas covalentes e para a maioria dos polímeros, essas moléculas se encontram na forma de cadeias longas e flexíveis e possuem baixa densidade.

Essas moléculas longas são compostas por entidades estruturais conhecidas como unidades (mero), as quais se repetem sucessivamente ao longo da cadeia. O termo "mero" tem a sua origem na palavra grega *meros*, que significa parte; o termo polímero foi criado para significar muitos meros. Os polímeros podem ser divididos em três tipos devido o seu comportamento mecânico: termoplásticos, termorrígidos e elastômeros. O termo *termoplástico* é empregado para referir-se a qualquer plástico que flui ou que amolece quando é aquecido e endurecem quando são resfriados – processos que são totalmente reversíveis e que podem ser repetidos. O termo termorrígido é empregado para referir-se a um plástico o qual se torna permanentemente duro com a aplicação de calor, e não amolece com um aquecimento subsequente, ou seja, não podem ser remoldados. Os elastômeros por sua vez são materiais borrachosos compostos de cadeiras poliméricas relativamente longas, apresentando alto nível de flexibilidade, ductibilidade e deformação quando submetidos à tensões externas. Uma borracha típica pode apresentar um alongamento de até 10 vezes o seu comprimento inicial devido à sua alta mobilidade molecular [Drobny, 2007].

Em uma classificação pelo tipo de aplicação, também pode-se citar os denominados polímeros de engenharia, os quais foram desenvolvidos com o objetivo de combinar características como baixa densidade e alta rigidez para amplas faixas de temperatura (Loon, 2005).

#### 3.3. Polioximetileno

O polímero em estudo, Polioximetileno (POM), é um dos termoplásticos de engenharia mais utilizados por possuir ótimas propriedades mecânicas tais como resistência à tração, rigidez torcional, ótima resistência à fadiga, à temperatura, à fluência e ao desgaste, possuindo uma forte estabilidade dimensional e alta resistência química [Loon, 2005]. O POM é altamente utilizado como material de engenharia, competindo arduamente não só com nylons, mas também com metais e cerâmicos.

O Polioximetileno, também conhecido por Poliacetal ou Delrin®, começou a ser comercializado no início da década de 1960. Estudos provam que as resinas de POM são polimeros cristalinos com um grau de cristalinidade variando de 58 a 77% [Loon, 2005]. O POM tem evoluído significativamente nos últimos anos na substituição dos metais pelas suas propriedades únicas.

Além de não ser higroscópico, é extremamente resistente a uma grande faixa de solventes e mantém excelente estabilidade em ambientes agressivos.

Entretanto, o POM não deve ter contato com ácidos fortes e a fortes agentes oxidantes, tais como os hipocloretos. A grande maioria dos POM's disponíveis no mercado possui equivalência aos nylons quanto à resistência à fadiga, à fluência, quanto à dureza e ao desgaste com trabalho com água, porém os nylons são superiores quanto à resistência ao impacto e à resistência à abrasão [Loon, 2005].

## 4. DESCRIÇÃO DO PROBLEMA

#### 4.1. Comportamento mecânico do POM

O fabricante do material (Altécnica) utilizado na fabricação da carcaça apresenta somente os parâmetros mecânicos do material indicados na Tabela 4.1 segundo a norma DIN EN ISO 527 [DIN, 2012]. O coeficiente de Poisson foi obtido em literatura, onde vários trabalhos reportam o mesmo valor [Goodfellow, 2012; Dean, 2012].

Propriedade	Valor Nominal	Unidade	Referência
Tensão de Escoamento	62	MPa	Altécnica
Módulo de Elasticidade	2700	MPa	Altécnica
Coeficiente de Poisson	0,35	-	Goodfellow
Alongamento (ruptura)	30	%	Altécnica

Tabela 4.1 – Propriedades Mecânicas do Polioximetileno.

Sabendo que em sua grande maioria os polímeros possuem comportamento não linear, tais informações não são suficientes para conhecer a resposta mecânica do material. A norma DIN EN ISO 527, bem como a ASTM D638 recomenda obter e o módulo de elasticidade com a inclinação inicial da curva e a tensão de escoamento do material plástico no ponto onde a tensão começa decrescer ou no ponto de inflexão da curva, (ver Figura 4.1). Então, este ponto pode ocorre em grandes deformações e não necessariamente com uma relação linear entre tensão e deformação.

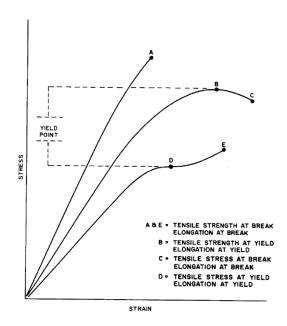


Figura 4.1 – Determinação da tensão de escoamento segundo a norma ASTM D638.

Outros trabalhos indicam a necessidade de considerar efeitos dissipativos sobre o material. Tscharnuter, 2012, utilizou o modelo de Schapery, um modelo não linear, viscoelástico, 3D, para a determinação do comportamento mecânico dependente do tempo do POM. Ele utilizou uma câmera para a medição da deformação axial e transversal do polímero em ensaios uniaxiais de tração e de compressão. Neste trabalho é demonstrado que o modelo de Schapery modela efetivamente o comportamento de relaxação, fluência e de carregamentos cíclicos do POM. Banabdallah, 2005, simulou em elementos finitos o desgaste de um pino de POM rotacionando com uma placa de aço. Considerou o material perfeitamente elástico ou elastoplástico até a sua ruptura.

#### 4.2. Modelagem

O Método dos Elementos Finitos é uma alternativa aos modelos matemáticos, e tem por objetivo a busca de uma solução aproximada para as variáveis de interesse no domínio. É um método bastante flexível, pois permite sua aplicação a problemas estruturais lineares, não-lineares, de transferência de calor, eletromagnetismo, entre outros [Liu e Quek, 2003].

A modelagem é um conceito aplicado amplamente em todo o âmbito científico, podendo se tratar de modelagem numérica, computacional, matemática, física, etc. A modelagem consiste basicamente na construção de um modelo que descreva satisfatoriamente desejadas características de um sistema real. Um dos métodos geralmente utilizados com este fim é o de identificar o modelo mais simples capaz de reproduzir este comportamento de interesse [Belytschko et. al., 2000].

#### 4.3. Condições de contorno.

O sistema de pulverização presente no avião aeroagrícola é bastante complexo. O avião voando a uma velocidade constante imprime um sistema o qual pode ser analisado de forma inversa, ou seja, como se o avião estivesse parado tendo o vento na direção do mesmo à mesma velocidade constante. O vento é o elemento motor do sistema de pulverização, batendo nas pás da turbina eólica e fazendo ela girar, rotacionando também o impelidor da bomba centrífuga. A diferença de pressão causada pelo movimento do rotor implica em um fluxo de fluido originado do *hopper* (tanque do avião onde fica armazenado o fluido a ser pulverizado), através da bomba centrífuga e até os bicos pulverizadores.

A bomba centrífuga do presente trabalho é uma bomba horizontal, de um estágio, fluxo radial, em balanço e com rotor fechado. A velocidade constante do avião imprime em uma rotação constante no eixo, juntamente com um fluxo constante de fluido pela bomba e também uma pressão constante no interior da carcaça da bomba. Os componentes analisados no presente trabalho são todos para o avião aeroagrícola Aeroneiva EMB 201A, modelo mais utilizado no Brasil hoje sendo comercializado também em uma versão com motor movido 100% a Álcool.

Conhecendo o problema pode-se partir para determinação de cargas. Uma vez que o impelidor pode sofrer acelerações e desacelerações é interessante realizar uma análise dinâmica do eixo em funcionamento para determinação das cargas dinâmicas que agem nos mancais. Apesar de tentativas de obter dados para a realização destes cálculos, não foi possível obtê-los. Assim, para os fins deste trabalho serão adotadas apenas reações estáticas dos mancais, correspondentes a quando o impelidor encontra-se em regime permanente.

O eixo da bomba centrífuga encontra-se biapoiado em dois mancais de rolamento e é carregado em ambas as extremidades. Resolvendo estaticamente o sistema representado pelo eixo pode-se obter facilmente as reações nos mancais, as quais são transmitidas integralmente para o corpo da bomba centrífuga. Resolvidas as equações de mecânica vetorial para o eixo da bomba, encontra-se que os mancais têm reações de 39N e -3N – os cálculos das reações encontram-se no Apêndice I.

Além de cargas do impelidor, existem cargas devido à pressão interna. Segundo Thomson, 2010, a máxima pressão interna de operação da bomba centrífuga é de 0,41 MPa. Vale comentar que esta é a pressão de operação para aeronaves americanas, as quais são maiores

que as brasileiras, tanto em tamanho da aeronave em si quanto ao dimensionamento do sistema de pulverização da mesma, ou seja, estima-se que a pressão de operação para o presente trabalho seja igual ou menor.

A bomba é conectada pelo eixo às pás da turbina eólica, enquanto que as duas máquinas de fluido estão presas à estrutura inferior do avião pelo suporte E indicado na Figura 4.2, a qual mostra um sistema completo com a bomba centrífuga em ano inoxidável.

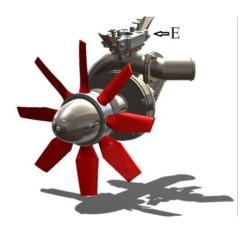


Figura 4.2 – Esquematização das condições de contorno.

#### 5. METODOLOGIA

Neste capítulo é proposta a análise de um caso de carregamento típico para a carcaça e corpo da bomba centrífuga em estudo. Esta análise será realizada através de um modelo estático, que engloba a bomba com elementos e carregamentos simplificados para a representação do seu funcionamento em situação normal de operação. O modelamento foi realizado utilizando o software SOLIDWORKS e a análise foi realizada por meio do software ANSYS.

Sendo que a complexa geometria da bomba impõe inúmeras dificuldades para a geração da malha, foi utilizado o algoritmo de malha Patch Independent. Este algoritmo de malha lança mão de uma abordagem diferente, uma vez que ele não inicia com uma malha de superfície, mas utiliza ao invés disto um algoritmo de Octree, de forma que a geração de malha não fica restringida à todas as superfícies do modelo. Foram testadas diferentes malhas com diferentes refinos. A Figura 5.1 mostra a malha padrão utilizada em todas as simulações deste trabalho.

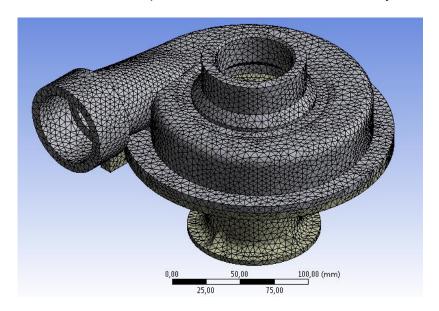


Figura 5.1 – Malha utilizada na simulação numérica

Como este trabalho está focado no estudo das dificuldades envolvidas na simulação numérica do comportamento mecânico do polímero utilizado na bomba, serão realizadas análises com diferentes modelos de material a fim de representar corretamente o comportamento mecânico do material. A escolha dos modelos constitutivos está limitada aos modelos implementados no software ANSYS.

#### 5.1. Modelo isotrópico linear

Um engenheiro que em um primeiro momento tiver apenas os parâmetros de material fornecidos pelo fabricante (Tab. 4.1) provavelmente será tentado a adotar a mesma estratégia de cálculo utilizada em material comuns à componentes estruturais, ou seja, utilizar um modelo elástico linear isotrópico. Assim, para fins de estudo este foi o ponto de partida. Então, assumindo que o Polioximetileno é um material Isotrópico linear, pode-se utilizar a Lei de Hooke generalizada para a resolução do problema.

Nesta análise o elemento utilizado para a simulação é o SOLID187, elemento tetraédrico de 10 nós e com comportamento de deslocamento quadrático, indicado para modelagem de geometrias irregulares.

#### 5.2. Testes experimentais

O estudo realizado neste trabalho sobre o comportamento mecânico de materiais poliméricos aponta que estes podem possuir um comportamento não linear, viscoelástico e alcançar grandes deformações mesmo em regime elástico. Assim, este não poderia ser simulado com a lei de Elasticidade Linear Isotrópica. Para verificar a real resposta mecânica do material em estudo foram realizados ensaios mecânicos. O ensaio de tração é um dos mais simples e praticado dentre os ensaios mecânicos, em que o corpo de prova é submetido à tração até a sua ruptura, enquanto quo no ensaio de compressão o material é submetido à compressão uniaxial. Ambos os ensaios têm por objetivo a determinação do comportamento do material às respectivas solicitações, registrando-se os dados de tensão e deformação aferidos [Marczak, 2006]. Adicionalmente aos ensaios uniaxiais foi realizado também um ensaio de relaxação para verificar a existência de comportamento viscoelástico no material, registrando as tensões, deformações encontradas e o tempo de ensaio. Estes ensaios de tração e compressão uniaxial são normatizados pelas normas ASTM D638-03 e D695-02ª, respectivamente. O ensaio de relaxação é normatizado pela norma ASTM D2990-09 à exceção da geometria do corpo de prova.

Todos os ensaios foram realizados à temperatura ambiente, que é a mesma temperatura de operação da bomba centrífuga. A figura 5.2 mostra as curvas Tensão x Deformação para todos os ensaios, juntamente com os seus valores médios obtidos através do MATLAB. Em todos os ensaios observa-se um comportamento altamente não linear antes de alcançar o ponto de escoamento (ponto definido segundo as normas de ensaios de plástico) e um comportamento de relaxação significativo (ver Apêndice IV). Nota-se que os parâmetros do fornecedor (Tab. 4.1) são muito próximos dos obtidos na Fig 5.2 (tração). Com estes resultados pode-se verificar que o material não se comporta de forma linear, portanto para uma boa representação do material deve-se usar um modelo para materiais com comportamento não linear, e se possível com capacidade de representar fenômenos viscoelásticos.

Existem em literatura diferentes modelos com capacidade de representar adequadamente os comportamentos observados nos ensaios mecânicos. Porém, em sua maioria são necessários vários parâmetros e uma implementação manual do modelo constitutivo no software ANSYS. Assim, para este trabalho decidiu-se por estudar apenas alguns modelos já implementados no ANSYS, capazes de simular comportamentos não lineares e viscoelasticidade. Para o comportamento não linear elástico foi utilizado um modelo hiperelástico e um modelo multielástico. Para levar em conta o comportamento viscoelástico foi utilizada a série de Prony.

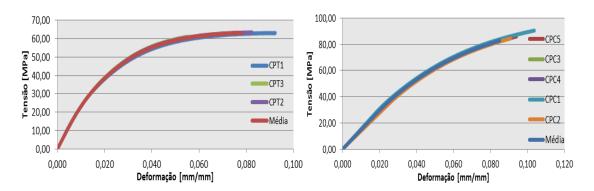


Figura 5.2 – Curvas Tensão x Deformação para os ensaios de Tração e Compressão Uniaxial

#### 5.3. Modelo hiperelástico

O modelo de Mooney-Rivlin é o mais celebrado dos modelos hiperelásticos clássicos, sendo baseado no 1º e 2º Invariantes de deformação [Marczak, 2006]. O modelo em questão é conhecido por ser bastante simples, entretanto a simulação numérica de incompressibilidade perfeita não é nada simples e geralmente são necessárias diversas técnicas de elementos finitos em que a pressão hidrostática é uma das variáveis estruturais. Portanto o ANSYS não utiliza a equação clássica de Mooney-Rivlin para a solução hiperelástica, mas sim lança mão de uma equação regularizada a qual introduz uma compressibilidade em modelos originalmente incompressívels [Neto, 2008]. A energia de deformação utilizada no ANSYS para três termos de Mooney-Rivlin é dada por [ANSYS]:

$$W(I_1^*, I_2^*, J) = C_{01}(I_1^* - 3) + C_{10}(I_2^* - 3) + C_{11}(I_1^* - 3)(I_1^* - 3) + \frac{1}{d}(J - 1)^2$$
(5.2)

em que apenas o último termo da equação é responsável inteiramente pela parte volumétrica. A tensão de Piola Kirchhoff é, por sua vez, calculada por [Neto, 2008]:

$$S_{ij} = \frac{\partial W}{\partial E_{ij}} \tag{5.3}$$

Modelos hiperelásticos são conhecidos por necessitarem de dados de diferentes ensaios para serem aplicados com segurança. Os mais usuais, além do ensaio de tração, são os ensaios de cisalhamento, compressibilidade e biaxial. Com não foi possível obter outros dados além dos uniaxiais, procedeu-se apenas com a identificação de parâmetros com o dado de tração. Inserindo-se os dados de tração obtidos experimentalmente se identificam as constantes de Mooney-Rivlin e o ajuste do modelo para o polioximetileno, como mostrado na Figura 5.3.

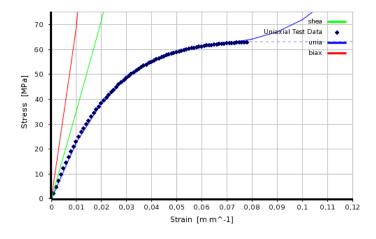


Figura 5.3 – Ajuste de Mooney-Rivlin com 3 Parâmetros para o ensaio de tração uniaxial.

Sendo a linha contínua em azul o ajuste do modelo para o ensaio realizado, em pontilhado azul. Vale lembrar que apenas o dado de tração uniaxial não fornece indicação do real comportamento transversal ou volumétrico. Nesta análise o elemento utilizado para a simulação é o SOLID187. Foram feitos ajustes com outros modelos hiperelástico clássicos além do Money-Rivlin, embora somente o modelo utilizado apresente um ajuste satisfatório para o comportamento físico do material. Os gráficos das aproximações com os outros modelos encontram-se no Apêndice II.

#### 5.4. Modelo Multilinear Elástico

Um modelo que surge como alternativa neste estudo, capaz de representar os dados experimentais de tração e o comportamento de deformação transversal do material, é o modelo multilinear elástico do ANSYS. Este caracteriza melhor o material do que um modelo que utilize somente um tipo destes dados. O Modelo Multilinear Elástico do ANSYS fornece uma modelagem não-linear do problema utilizando o Módulo de Elasticidade fornecido como inclinação inicial da curva e ajusta esta inclinação com pontos fornecidos pelo ensaio, utilizando ainda como parâmetro do material o coeficiente de Poisson. O comportamento deste modelo pode ser verificado na Figura 5.4.

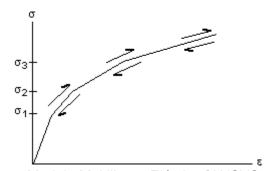


Figura 5.4 – Modelo Multilinear Elástico [ANSYS 14.0 Help].

Para simulação com este tipo de modelo, é necessária a utilização de um elemento compatível com o mesmo. Faz-se a troca do elemento SOLID187 para o SOLID92, que é bastante parecido com o elemento anterior – também tetraédrico de 10 nós e suporta grandes deformações, porém apenas o SOLID92 suporta o modelo multilinear elástico. A elasticidade multilinear é ativada pela função TB.MELAS. A desvantagem deste elemento é que ele não é capaz de utilizar a série de Prony para representar comportamentos viscoelásticos, como faz o SOLID187.

#### 5.5. Série de Prony.

A Série de Prony é um recurso utilizado para modelar o comportamento de relaxação e de fluência de um material em relação ao tempo, munido de parâmetros do material. A equação para o módulo cisalhante de relaxação é:

$$g_R(t) = 1 - \sum_{i=1}^{N} g_i [1 - e^{\frac{-t}{\tau_i}}]$$
 (5.4)

O seu ajuste e comentários são apresentados no Apêndice IV, segundo Imaoka, 2008.

#### 6. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nesta seção são apresentados os resultados das simulações de elasticidade. A simulação incluindo efeitos viscoelásticos, assumindo uma alta velocidade de aplicação de carga, é

apresentada no Apêndice IV. Neste estudo é evidente a contribuição de efeitos viscosos na análise de tensões. Porém, sua magnitude depende de características dinâmicas dos carregamentos aplicados, que não são conhecidas para este estudo.

#### 6.1. Modelo elástico linear isotrópico

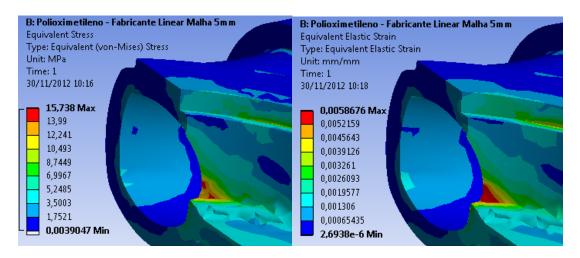


Figura 6.1 – Máximas tensão e deformação para o modelo linear isotrópico, respectivamente.

A máxima tensão obtida pelo modelo foi de 15,8 MPa, indicando que o componente trabalha com um coeficiente de segurança de 3,92 enquanto que a deformação máxima é de aproximadamente 0,58%. Embora os resultados tenham sido bastante abaixo da tensão de escoamento, em maiores níveis de deformação, estes não condizem com a realidade, uma vez que o modelo linear não consegue ajustar o real comportamento do material sobre toda a região elástica.

#### 6.2. Modelo Hiperelástico

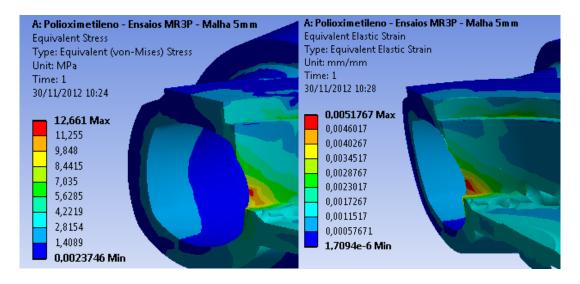


Figura 6.2 – Máximas tensão e deformação encontradas pelo modelo hiperelástico, respectivamente.

A máxima tensão obtida foi de 12,7 MPa enquanto que a máxima deformação foi de aproximadamente 0,51% que corresponde a um coeficiente de segurança de operação de 4,88. O modelo hiperelástico teria a capacidade de simular mais realisticamente o

comportamento do polímero uma vez que ele não segue uma linearidade e já contém o real comportamento do polioximetileno sob tração. Porém, observando criticamente a Figura 5.3 verifica-se que os ajustes do modelo hiperelástico para comportamento de cisalhamento e biaxial são bastantes elevados, e não foram confirmados experimentalmente, podendo na realidade imprimir uma rigidez a cisalhamento muito diferente da real, ou seja, podendo ser muito maior.

#### 6.3. Modelo multilinear elástico

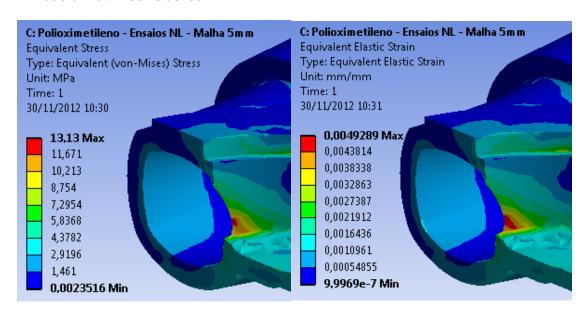


Figura 6.3 – Máximas tensão e deformação para o modelo elástico multilinear, respectivamente.

Mais uma vez confrontando a tensão máxima obtida com os dados do fabricante, chega-se a um valor de 4,72 para o coeficiente de segurança para a simulação com o modelo não-linear, com uma deformação máxima de 0,5%. Este coeficiente é muito maior que o do modelo elástico isotrópico linear.

#### 7. CONCLUSÕES

O presente trabalho apresentou uma metodologia com três abordagens de modelos para simulação numérica da operação de uma bomba centrífuga com a sua carcaça e corpo produzidos em polioximetileno tentando reproduzir a resposta mecânica obtida experimentalmente e por tabelas do fabricante.

A metodologia adotada se mostrou eficaz uma vez que foram estudados diferentes modelos na simulação da bomba centrífuga, sendo possível identificar modelos que possuem a capacidade de representar o comportamento do material em toda a região elástica.

Não foi possível realizar uma análise real sobre a bomba centrífuga incluindo fenômenos viscosos, pois o autor não possuía dados dinâmicos de carregamento. Porém, assumindo uma lata velocidade de aplicação dos carregamentos este se demonstrou muito significativo. Este resultado evidencia a complexibilidade de cálculo envolvido na utilização de materiais poliméricos em componentes estruturais.

Devido a baixa magnitude de carga utilizada na analise de tensões, os três modelos seriam passíveis de aplicação, pois todos se encontram em deformações relativamente pequenas, apresentando então um comportamento similar nesta faixa de utilização. Assim, a bomba fabricada com polioximetileno não possui problemas de dimensionamento para as cargas utilizadas possuindo um alto coeficiente de segurança para todos os modelos estudados. O alto coeficiente de segurança garante a sua segurança mesmo para as incertezas envolvidas na

obtenção das condições de contorno. Nota-se ainda que a tensão máxima ocorre de forma muito localizada. Caso fossem utilizadas cargas majoradas de um coeficiente de segurança devido alguma norma aeronáutica, a escolha do modelo adequado seria de suma importância. Analisando criteriosamente os resultados obtidos, a capacidade representativa dos modelos aos dados experimentais, e as curvas experimentais disponíveis, pode se perceber que o modelo multilinear elástico é o que melhor simularia com fidelidade experimental o comportamento do polioximetileno, uma vez que os seus reais comportamentos de tração e a relação entre comportamentos de deformação longitudinal e transversal (Coeficiente de Poisson) são computados na simulação.

Dentre os modelos estudados, o modelo hiperelástico era o candidato principal a cumprir a tarefa de melhor reprodução do comportamento experimental. Porém, para uma melhor aproximação do real comportamento do polioximetileno, este deve incluir também os comportamentos experimentais frente à esforços de cisalhamento e, se possível, biaxiais, assim o modelo fornecerá um resultado mais verídico se o modelo fornecer bons ajustes para todas as curvas.

O modelo elástico linear isotrópico é o mais simples, porém poderia ser utilizado apenas em uma pequena região inicial de deformações onde o comportamento pudesse ser aproximado por uma reta.

O método empregado viabilizou a análise estrutural com esforço computacional aceitável de um problema complexo. A utilização dos dados experimentais no comportamento do polioximetileno foi válido para o melhor entendimento do problema e simulação numérica com os modelos utilizados.

A simulação numérica do efeito viscoelástico foi deixada em segundo plano, pois a bomba entra em operação por apenas um curto período de tempo e por não haver dados de velocidade de carregamentos e descarregamentos a disposição, sendo então difícil conceber a sua analise numérica.

Por fim, o autor propõe os seguintes trabalhos relacionados ao tema:

- Realização de testes experimentais de cisalhamento e biaxial para um ajuste mais realístico do modelo hiperelástico utilizado;
- Medições experimentais para obtenção de mais parâmetros da bomba, os quais possibilitem obtenções de condições de contorno mais reais. Seria possível ainda obter através de uma análise dinâmica as cargas sobre os mancais devido a aceleração e desaceleração do impelidor durante o seu funcionamento. Esta análise não foi realizada pois não haviam dados disponíveis;
- Estudo mais aprofundado do efeito da viscoelasticidade e fadiga na operação contínua da aeronave com sucessivas operações da bomba em um mesmo vôo ou em anos de operação da aeronave;
- Implementação de modelos mais avançados para análise por elementos finitos;
- Estudo da viabilidade de mudança do material da bomba centrífuga. Por exemplo, a Resina de Acetal Delrin de Média Viscosidade 311DP, produzido pela DuPont do Brasil, possui melhores propriedades mecânicas que o material atualmente utilizado;
- Otimização da geometria para redução de material uma vez que esta se encontra superdimensionada.

#### REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANSYS®; "Academic Research, Release 14.0, Help System", ANSYS, Inc., <a href="http://www.ansys.com">http://www.ansys.com</a>, 2012.

API 610; "Centrifugal pumps for Petroleum, Heavy Duty Chemical, and Gas Industry Services", 2010.

Belytschko, T.; Liu, W.K.; Moran, B.; "Non Linear Finite Elements for Continua and Structures", John Wiley & Sons, 1st edition, 2000.

Dean, G.D.; McCartney, L.N.; Mera, R.; Urquhart, J.M.; "Modeling Nonlinear Viscoelasticity in Polymers for Design Using Finite Element Analysis", 2011.

Deutsche Institut für Normung (DIN) EN ISO 527; "Plastics – Determiantion of Tensile Properties", 2012.

Drobny, J.G.; "Handbook of Themoplastic Elastomers", Plastics Design Library, 1<sup>st</sup> edition, 2007.

DuPont do Brasil; "Guia de Produtos e Propriedades – Resina de Acetal Delrin®", 2012.

Fonseca, J.S.O.; "Mecânica dos Sólidos para a Engenharia Mecânica", Apostila Editada pelo Autor, UFRGS, 2002.

Finish Thompson; "Premium Magnetic-Drive Sealless DB/SP Centrifugal Pumps Brochure", 2012.

Goodfellow Corporation; "Polyoxymethylene Catalogue", 2012 Hydraulic Instutite Standard (HIS) 1.3; "Rotodynamic (Centrifugal) Pumps for Design and Application", 2008.

Imaoka S.; "Analyzing Viscoelastic Materials", ANSYS Advantage, Volume II, Issue 4, pp 46-47, 2008

Liu G.R.; Que S.S.; "The Finite Element Method: a Practical Course", Butterworth-Heinemann, 1st edition, 2003.

Marczak, R.J.; "Elementos Finitos: Curso de Introdução ao Método", Apostila Editada pelo Autor, UFRGS, 1995.

Neto, E.S.; "Computational Methods for Plasticity: Theory and Applications", John Wiley & Sons, 1<sup>st</sup> edition, 2008.

Rubinstein, M.; "Polymer Physics", Oxford University Press, 1<sup>st</sup> edition, 2003.

Thomson, S.J.; Huang, Y.; Hanks, J.E.; Martin, D.E.; Smith, L.A.; "Improving Flow Response of a Variable-Rate Aerial Application System by Interactive Refinement", United States Department of Agriculture, 2010.

Ward, I.M.; Sweeney, J.; "The Mechanical Properties of Solid Polymers", John Wiley & Sons, 2<sup>nd</sup> edition, 2008.

# APÊNDICE I - CONDIÇÕES DE CONTORNO

Determinando as condições de contorno para o eixo da bomba centrífuga. A figura I.1 esquematiza o funcionamento do sistema de pulverização do avião agrícola, enquanto que a figura I.2 apresenta uma representação das forças agindo no sistema estudado.

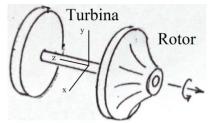


Figura I.1 – Sistema de pulverização.

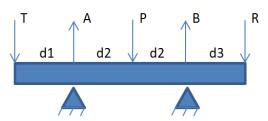


Figura I.2 – Forças sobre o sistema.

#### Legenda:

T - Peso exercido pela Turbina = 22,8N

A - Reação no primeiro Mancal

P – Peso exercido pelo eixo = 3,67N

B - Reação no segundo Mancal

R - Peso exercido pelo Rotor = 9,14N

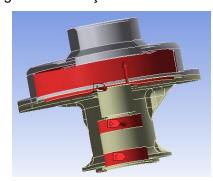


Figura I.3 – Cargas sobre a geometria

Se tratando de um problema de Cinética Tridimensional de Corpo Rígido, as seguintes equações descrevem o equilíbrio do sistema:

$$\sum_{} Fy = 0$$

$$\sum_{} Fx = 0$$

$$Fz = 0$$

$$\sum_{i} M_{x} = I_{x} \dot{\omega}_{x} - I_{y} \Omega_{z} \omega_{y} + I_{z} \Omega_{y} \omega_{z}$$

$$\sum_{i} M_{y} = I_{y} \dot{\omega}_{y} - I_{z} \Omega_{x} \omega_{z} + I_{x} \Omega_{z} \omega_{x}$$

$$\sum_{i} M_{z} = I_{z} \dot{\omega}_{z} - I_{x} \Omega_{y} \omega_{x} + I_{y} \Omega_{x} \omega_{y}$$

Como não foi considerada a aceleração do impelidor durante seu funcionamento², percebe-se que as componentes da velocidade angular permanecem constantes para quaisquer orientação dos eixos x, y e z, portanto  $\dot{\omega}_x = \dot{\omega}_y = \dot{\omega}_z = 0$ . As velocidades angulares permanecem constantes, sendo somente  $\omega_z \neq 0$ , e como  $\omega = \Omega$ , tem-se que:

$$\Sigma M_x = \Sigma M_y = \Sigma M_z = 0$$
 assim como  $\Sigma F_x = \Sigma F_y = \Sigma F_z = 0$ 

Resolvendo as equações  $\Sigma M_z=0$  e  $\Sigma F_y=0$ , obtêm-se os seguintes valores para as reações A e B:

$$A = 39N$$
$$B = -3N$$

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup> Caso seja considerada a aceleração ou desaceleração do impelidor o equacionamento permanece o mesmo, porém, serão geradas contribuições de origem dinâmica nas forças de reação.

#### Apêndice II - AJUSTE POR OUTROS MODELOS HIPERELÁSTICOS

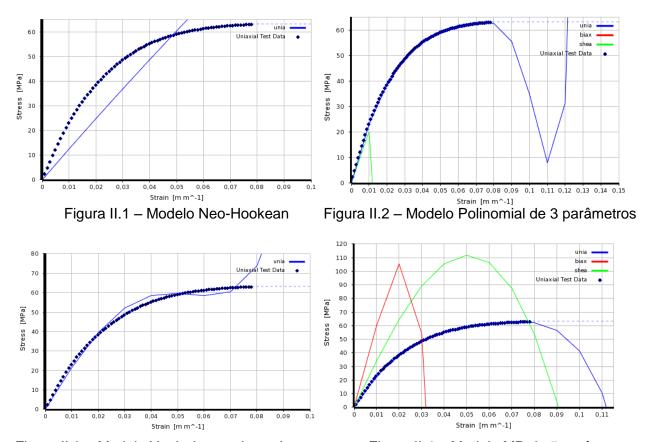


Figura II.3 – Modelo Yeoh de terceira ordem

Figura II.4 – Modelo MR de 5 parâmetros

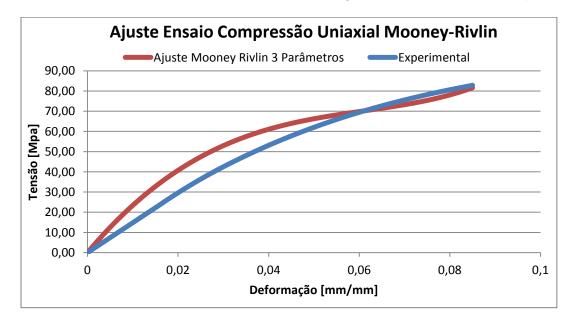


Figura II.5 – Ajuste de Mooney-Rivlin com 3 Parâmetros para o ensaio de compressão uniaxial.

# Apêndice III - COMPONENTES E ENSAIOS.

Neste apêndice são apresentados imagens dos componentes analisados, dos ensaios realizados e dos corpos de prova.



Figura III.1 – Fotos da Bomba Centrífuga



Figura III.2 – Fotos dos Corpos de Prova para os ensaios de Tração e Compressão

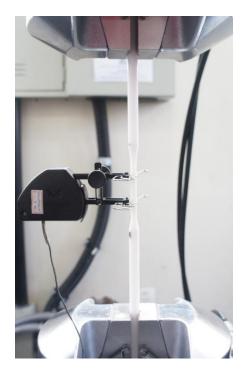


Figura III.3 – Foto do ensaio de tração uniaxial

## APÊNDICE IV - SIMULAÇÕES COM A SÉRIE DE PRONY

Na simulação de efeitos viscosos com série de Prony é realizado um estudo para avaliar a contribuição viscoelástica na análise de tensões do material em estudo. A curva experimental obtida em ensaio de relaxação (figura IV.1) é utilizada como dado para esta análise. Os resultados de tensão e deformação máximas são apresentados na figura IV.2, a deformação máxima em função do tempo na figura IV.3 e a tensão equivalente máxima de von Mises em função do tempo na figura IV.4.

Nesta análise é utilizado o modelo elástico linear isotrópico com a adição de uma série de Prony para incluir os efeitos desejados, onde é possível fazer uma análise comparativa com o resultado sem o efeito viscoso. Apesar de não serem utilizadas taxas de deformações reais, pois estes dados não estavam disponíveis, neste estudo é evidente a contribuição de efeitos dissipativos devido a viscosidade do material. A tensão equivalente aumenta em aproximadamente 20MPa (120%) devido ao fato de as cargas serem aplicada em 1 segundo e mantidas constantes durante 1 min.

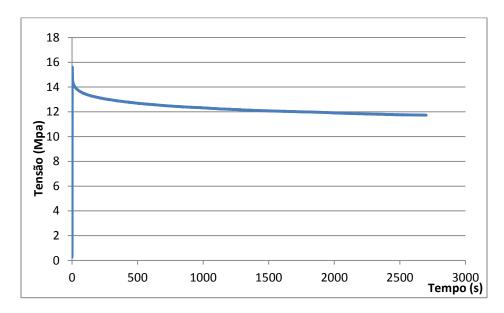


Figura IV.1 – Curva Tensão x Tempo para o ensaio de Relaxação

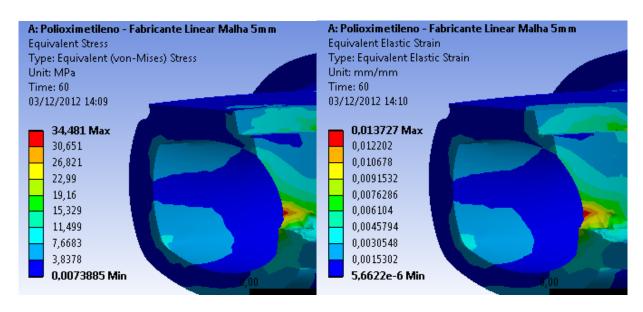


Figura IV.2 – Resultado de tensão e deformação para a lei de Hooke generalizada com efeitos viscosos.

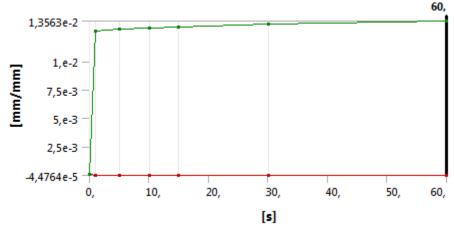


Figura IV.3 – Gráfico da deformação máxima em função do tempo.

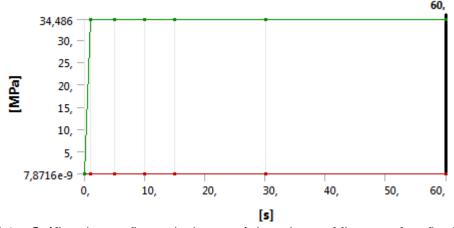


Figura IV.4 – Gráfico da tensão equivalente máxima de von Mises em função do tempo.