

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

UMA METODOLOGIA PARA CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA DE UMA
MANGA DE TERMOPLÁSTICO PARA SEMI-EIXO HOMOCINÉTICO

por

Luciano Viezzer Giacomazzi

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, Julho de 2017



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

UMA METODOLOGIA PARA CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA DE UMA
MANGA DE TERMOPLÁSTICO PARA SEMI-EIXO HOMOCINÉTICO

por

Luciano Viezzer Giacomazzi

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^a. Dr^a. Thamy Cristina Hayashi
Coordenadora do Curso de Engenharia Mecânica

Área de Concentração: **Mecânica dos Sólidos**

Orientador: Prof. Dr. Jakson Manfredini Vassoler

Comissão de Avaliação:

Prof. Dr. Rodrigo Rossi

Prof. Dr. Rogério José Marcsak

Prof. Dr. Jakson Manfredini Vassoler

Porto Alegre, 03 de Julho de 2017.

AGRADECIMENTOS

Agradeço imensamente a minha família, por todo apoio e incentivo que me proporcionaram durante toda a graduação. Ao pessoal do GMAp, que auxiliou na execução dos testes e implementação do algoritmo. Ao professor Jakson Manfredini Vassoler, pela dedicação e paciência. Ao colega Rafael Esperança, pela geração dos corpos de prova. Aos meus amigos, que estiveram comigo durante todo o trajeto e me auxiliaram a superar os diversos obstáculos.

GIACOMAZZI, L. V. **Uma Metodologia para Caracterização Mecânica de uma Manga de Termoplástico para Semi-Eixo Homocinético**. 2017. 17 folhas. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2017.

RESUMO

Polímeros termoplásticos são materiais que podem apresentar comportamento mecânico de difícil caracterização, que geralmente não podem ser representados pela lei de Elasticidade Linear (Hooke Generalizado) devido sua não linearidade. Existem em literatura, diversos modelos que permitem representar os comportamentos mecânicos de materiais poliméricos não lineares, que levam o nome de hiperelásticos. Estes materiais podem mudar significativamente seu comportamento dependendo do processo de fabricação utilizado. Logo, a proposta deste trabalho é estudar a caracterização do comportamento de uma manga de termoplástico aplicada em semi-eixos homocinéticos utilizando-se uma abordagem numérico-experimental. A caracterização deste tipo de material é realizada a partir da obtenção de parâmetros de modelos constitutivos através do ajuste de respostas mecânicas obtidas experimentalmente diretamente sobre o componente. No presente trabalho foram propostos três tipos de ensaios, sendo um deles realizado com corpos de prova extraídos do componente e os demais realizados com o componente final. Similarmente, foi desenvolvida uma simulação no software de elementos finitos ANSYS que representasse as mesmas condições de contorno expressas nestes ensaios. Além disso, foi implementada uma rotina no software MATLAB que permite identificar os parâmetros que melhor se adequam às respostas mecânicas reais para o modelo de Elasticidade Linear e o modelo Hiperelástico de Mooney-Rivlin. Os resultados demonstram que a metodologia implementada foi capaz de obter parâmetros constitutivos para os modelos estudados permitindo caracterizar o material diretamente com dados obtidos do componente.

PALAVRAS-CHAVE: Termoplásticos, Modelos Constitutivos, Identificação de Parâmetros Constitutivos

GIACOMAZZI, L. V. **A Methodology for Mechanical Characterization of a Thermoplastic Boot for Halfshafts**. 2017. 17 folhas. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2017.

ABSTRACT

Thermoplastic polymers are materials that can present mechanical behavior of difficult characterization, which generally cannot be represented by the law of Linear Elasticity (Hooke) due to its non-linearity. There are in literature several models that allow representation of the mechanical behavior of nonlinear polymeric materials, which are called hyperelasticity. These materials can significantly change their behavior depending on the manufacturing process used. Therefore, the purpose of this work is to study the characterization of the behavior of a thermoplastic boot applied to halfshafts using a numerical-experimental approach. The characterization of this type of material is carried out by obtaining parameters of constitutive models through the adjustment of mechanical responses obtained experimentally directly on the component. In the present work three types of tests were proposed, one of them being carried out with test specimens extracted from the component and the others carried out with the final component. Similarly, a simulation was developed in the finite element software ANSYS that represented the same test conditions expressed. In addition, a routine was implemented in the software MATLAB to identify the parameters to the Linear Elasticity model and the Mooney-Rivlin Hyper Elastic model that best fit the real mechanical responses. The results demonstrate that the presented methodology was capable of obtaining constitutive parameters for the studied models allowing material characterization through experimental data from the final component.

KEYWORDS: Thermoplastics, Constitutive Models, Identification of Constitutive Parameters

ÍNDICE

1. INTRODUÇÃO	1
2. OBJETIVOS	1
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	2
3.1. Semi-eixo homocinético e mangas	2
3.2. Polímeros termoplásticos	3
3.3. Modelos constitutivos	5
3.4. Problema inverso	6
4. METODOLOGIA.....	7
4.1. Obtenção de respostas experimentais.....	7
4.2. Modelo numérico e cálculo analítico	9
4.3. Identificação dos parâmetros.....	11
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	12
6. CONCLUSÃO.....	14
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	15
APÊNDICE A	16

1. INTRODUÇÃO

Devido a crescente utilização de materiais termoplásticos como componentes estruturais, torna-se necessário buscar melhorias em seus projetos e dimensionamentos. A maior precisão no cálculo de esforços internos permite uma redução de custos desnecessários acarretados pelo superdimensionamento. Um dos motivos que levam os termoplásticos a ocupar cada vez mais espaço em aplicações estruturais é por possuírem algumas propriedades equivalentes às dos metais e oferecerem um menor custo com maior facilidade de produção. No entanto, a principal dificuldade em se trabalhar com materiais termoplásticos reside no seu comportamento mecânico que pode apresentar respostas não lineares, deformações permanentes, sensibilidade à taxa de deformação, à pressão e à temperatura de aplicação, além de uma dependência acerca do processo de fabricação envolvido.

As mangas, aplicadas em semi-eixos homocinéticos, cuja principal função é garantir o isolamento das graxas no interior das juntas homocinéticas, podem ser fabricados com material termoplásticos. Essas fazem-se presentes para evitar falhas nos componentes internos das juntas devido às elevadas temperaturas de aplicação. As mangas de termoplástico vêm sendo fabricadas através de um processo combinado de extrusão e soprimento, assumindo uma geometria extremamente complexa e que apresenta grandes deslocamentos durante a sua aplicação. Para a melhoria no dimensionamento deste componente é necessário estimar tensões e deformações agindo em todo o corpo. Por se tratar de uma geometria de difícil modelamento, com espessura variável, uma alternativa é usar métodos numéricos para seu dimensionamento. Porém, para isto, é necessário conhecer a resposta mecânica do material do componente.

Uma vez que o método de fabricação pode levar a diferenças entre as propriedades mecânicas da matéria prima e do produto acabado, a caracterização numérico-experimental deve ser realizada sobre amostras do componente final ou mesmo com o próprio componente. Este aspecto dificulta a metodologia de caracterização deste tipo de material porque somente assim é possível garantir uma fiel representação através de modelos constitutivos adequados.

Para caracterização de materiais termoplásticos, dependendo do modelo constitutivo a ser empregado, também pode ser necessário realizar mais de um ensaio mecânico, diferentemente do observado em materiais metálicos, onde apenas um ensaio é suficiente para caracterizar um modelo elástico linear (Hooke). No emprego de modelos hiperelásticos, sabe-se que são necessários até três ensaios que produzam informações de diferentes tipos de deformações, a fim de identificar um modelo adequado para o referido material. Ao invés de realizar diversos experimentos, a princípio, as tecnologias numéricas modernas permitiriam analisar e escolher uma correta relação constitutiva que representaria o material, através de ensaios diretamente sobre o componente sob combinação de campos de deformação.

O Método dos Elementos Finitos (FEM) é uma poderosa técnica computacional para resolução dos mais diversos problemas de engenharia, que comporta diversos modelos capazes de representar o comportamento dos termoplásticos. Utilizando-se o FEM em conjunto com uma relação constitutiva que represente o material, seria possível otimizar a geometria final do componente em análise e deste modo, evitando a usual técnica da tentativa e erro comumente utilizada no projeto de componentes mecânicos quando não se pode estimar o estado de tensões e deformações sobre este.

2. OBJETIVOS

O objetivo deste trabalho é estudar e desenvolver uma metodologia para caracterização de uma manga de termoplástico, que permitiria futuramente melhorias no projeto através de simulações numéricas para dimensionamento de tal componente. Em função da geometria da manga, somado com a complicada resposta mecânica normalmente observada em materiais termoplásticos, neste estudo serão comparados os modelos constitutivos de Elasticidade Linear Isotrópica (Hooke) e um modelo de Hiperelasticidade, que compreendem os comportamentos de elasticidade não-linear e viscoelasticidade, proposto por Mooney-Rivlin.

Para a caracterização, é proposta uma técnica de resolução do problema inverso que faz o uso da estratégia Finite Element Method Updating (FEMU), fazendo uso de dados obtidos

sobre um corpo de prova e de ensaios sobre o componente juntamente com uma simulação através do Método dos Elementos Finitos. Visando assim, determinar os parâmetros dos modelos constitutivos analisados que melhor representem o componente.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. SEMI-EIXO HOMOCINÉTICO E MANGAS

Atualmente, a maioria dos veículos usa o sistema de propulsão que utiliza semi-eixos homocinéticos nas rodas dianteiras, chamados *halfshafts*. A função deste componente é transferir torque, proveniente do motor do veículo, integralmente para as rodas, mantendo constante a velocidade de rotação e permitindo alterações no comprimento e no ângulo de articulação das juntas. A solução prevê uma junta fixa que é acoplada ao cubo de roda do veículo e outra junta deslizante que se conecta à caixa de câmbio que é conectada ao motor, conforme a figura 3.1. Ambas as juntas são interconectadas por um eixo, tubular ou maciço e ambas as juntas são protegidas pelas chamadas mangas ou coifas.

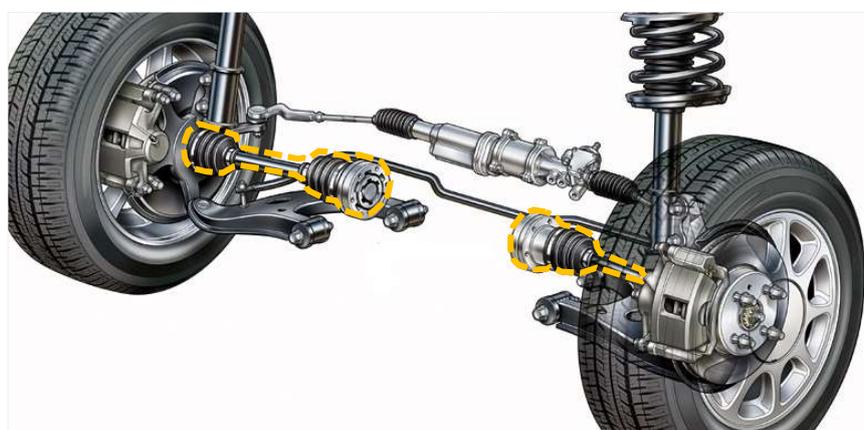


Figura 3.1 – Sistema dianteiro de propulsão de um veículo atual. Semi-eixos homocinéticos no lado direito e lado esquerdo contendo cada um uma junta fixa e uma junta deslizante.

Costumeiramente chamadas de coifas, as mangas assumem um papel crítico no desempenho e na vida de um semi-eixo homocinético. Sua principal função é reter a graxa presente no interior das juntas e protegê-la de agentes externos enquanto possibilita a angulação da junta. As mangas podem ser subdivididas em duas categorias de projeto dependendo de sua aplicação. As mangas presentes no lado fixo do semi-eixo precisam operar com articulações de 50°. As aplicações do lado deslizante operam com menores angulações, de até 25°, porém exigem movimentos longitudinais que precisam ser previstos no projeto das mangas, garantindo uma leve diferenciação nestes dois grupos.

Inicialmente, estes componentes foram desenvolvidos utilizando-se borracha como matéria prima, porém, juntamente com o desenvolvimento de graxas mais eficientes ou graxas para altas temperaturas, foram desenvolvidos novos projetos de mangas fazendo-se a utilização de materiais termoplásticos em sua composição. Elastômeros Termoplásticos (TPE) assumiram um papel importante na composição deste tipo de componente. As mangas produzidas através deste tipo de material possuem uma melhor resistência ao desgaste e uma melhor compatibilidade com graxas de alta temperatura do que suas antecessoras. Além disso, o processo de fabricação mais otimizado permite a produção de peças complexas com muito mais eficiência e baixíssimo rejeito.

A geração destes componentes, visto a sua geometria diferenciada, utiliza o processo denominado Extrusão e Sopragem (Extrusion Blow Molding), processo usual na fabricação de peças de plástico ocas como as mangas. É de extrema importância verificar a vida útil desta peça afim de se evitar uma falha generalizada no semi-eixo. Numericamente, para se estimar esforços internos devido as condições de uso, se faz necessário o conhecimento da resposta

mecânica (curva tensão-deformação) do material. Como a resposta mecânica de um corpo de prova obtido da coifa pode resultar significativamente diferente daquela obtida de um corpo de prova com geometria normatizada, novas estratégias de caracterização são necessárias.



Figura 3.2 – Ilustração de uma manga de termoplástico de junta fixa, seccionada. Fonte: <https://www.fst.com>

3.2. POLÍMEROS TERMOPLÁSTICOS

Polímero é o nome dado a uma grande molécula construída a partir de estruturas menores chamadas de monômeros, ligadas umas com as outras através de ligações covalentes. São materiais originalmente provenientes da natureza, como é o caso de madeiras, borrachas, algodão, seda e o couro. Atualmente passaram a ser sintetizados em grande escala a partir de outras moléculas orgânicas menores, como é o caso dos plásticos, borrachas e fibras. A composição química destes materiais origina-se através do processo chamado de polimerização, onde as unidades de repetição estabelecem ligações covalentes umas com as outras formando longas cadeias poliméricas.

Os polímeros podem ser diferenciados segundo a sua estrutura molecular. Se todas as unidades de repetição forem do mesmo tipo, dá-se o nome de homopolímero, polímeros simples e mais comuns. Quando a cadeia apresenta duas ou mais unidades de repetição, toma o nome de copolímero. Dependendo da maneira em que estas unidades básicas se distribuem em um copolímero, definida durante a síntese do material, diferentes classificações foram criadas. As unidades de repetição podem combinar-se aleatoriamente, alternadamente, em blocos alternados ou em ramificações, conforme ilustrado na figura 3.3.

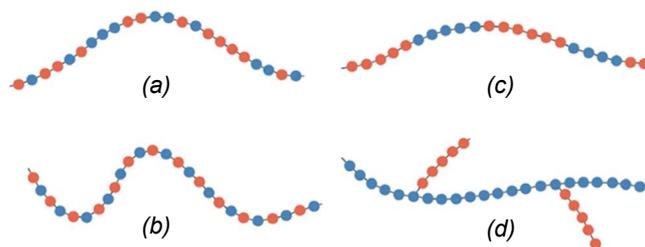


Figura 3.3 – Representação de um copolímero (a) aleatório, (b) alternado, (c) em blocos (d) ramificado. Adaptado de Callister, 2007.

A organização molecular dos polímeros pode se diferenciar entre estrutura cristalina e amorfa. A estrutura cristalina pode ser caracterizada pelo arranjo de macromoléculas de forma organizada e periódica. Já um polímero amorfo não apresenta este tipo de arranjo, a estrutura fica mais evidente quando o polímero se encontra em estado de líquido viscoso, podendo ser caracterizada pela falta de um ordenamento entre as cadeias poliméricas [Bresolin, 2016].

A natureza molecular controla as propriedades mecânicas dos materiais e, atualmente, os processos de síntese dos polímeros são capazes de manipular as interações entre suas macromoléculas, definindo o seu comportamento final e promovendo um desejado conjunto de

propriedades mecânicas para polímero. Uma das classificações mais básicas dentre estes materiais, os difere com relação a sua resposta mecânica, podendo ser classificados em termoplásticos, termofixos ou elastômeros [Callister, 2007].

Os materiais denominados termoplásticos são polímeros que amolecem quando aquecidos e enrijecem quando esfriados, apresentando diferentes comportamentos mecânicos para diferentes temperaturas de aplicação [Callister, 2007]. Em baixas temperaturas, podem apresentar comportamento frágil e um alto módulo de elasticidade rompendo-se sob pequenas deformações. Já quando submetidos a carregamentos em altas temperaturas, o mesmo material pode apresentar um comportamento mais próximo a um fluido viscoso, assumindo valores bem mais baixos para a rigidez do material, porém sustentando grandes alongamentos sem deformações permanentes.

Termoplásticos, costumeiramente chamados apenas de plásticos, vêm sendo utilizados de forma crescente como componente estrutural na indústria. Um benefício significativo destes materiais é que eles podem ser reciclados. Os polímeros termoplásticos apresentam baixa quantidade de ligações covalentes, em relação a polímeros termofixos, o que propicia a característica de remoldagem destes materiais. Componentes fabricados utilizando termoplásticos em sua composição, podem ser produzidos em larga escala graças às relativamente baixas temperaturas e pressões envolvidas em sua fabricação [Bresolin, 2016]. A maioria dos materiais poliméricos utilizados hoje em dia são termoplásticos, como polietileno e poliestireno.

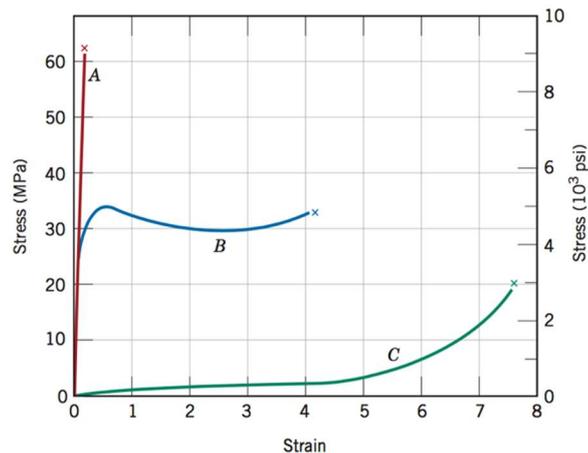


Figura 3.4 – Curvas tensão-deformação encontradas em materiais poliméricos (a) comportamento rígido, (b) comportamento plástico, (c) comportamento elastomérico. Adaptado de Callister, 2007.

Apesar da facilidade durante a fabricação, os polímeros termoplásticos apresentam respostas mecânicas extremamente complexas, podendo apresentar comportamentos de elasticidade não-linear, viscoplasticidade, sensibilidade a taxa de deformação e à temperatura, o que torna difícil prever o seu comportamento mecânico final. Além disso, outra dificuldade vem da forma complexa em que estes componentes são processados, transformando a matéria prima em um produto final. Como por exemplo para as mangas, componente abordado neste trabalho, onde a microestrutura, orientação molecular e cristalização, são alterados durante o processo de aquecimento e extrusão, modificando significativamente a resposta mecânica do componente final.

Existem copolímeros que somam as propriedades de termoplásticos e elastômeros, garantindo propriedades excepcionais que suprem necessidades com aplicações nos mais diversos ramos da engenharia como é o caso dos elastômeros termoplásticos mencionados anteriormente. Estes são constituídos de um segmento cristalino (rígido) e outro segmento amorfo (elástico) e suas características são definidas pela proporção de cada uma destas partes. Estes polímeros possuem propriedades mecânicas que podem ser radicalmente alteradas durante o processo de fabricação [Nielsen, 1993 et al.]. Hytrel é um tipo de TPE aplicado em mangas de semi-eixo que combina as melhores características dos elastômeros e o desempenho dos termoplásticos, com elevada resistência ao impacto e à fadiga, flexibilidade em baixas

temperaturas e ótimas propriedades retentivas sob altas temperaturas. Adicional a isto, resiste a deterioração de agentes químicos como graxas, óleos e solventes.

Reunidas todas estas considerações, pode-se concluir que a resposta mecânica para um termoplástico é extremamente difícil de ser prevista e não pode ser verificada apenas através de ensaios uniaxiais. Deve-se notar que ao se trabalhar com materiais plásticos, é possível obter diversas respostas distintas para um mesmo material apenas alterando as condições de teste [Crawford, 1998].

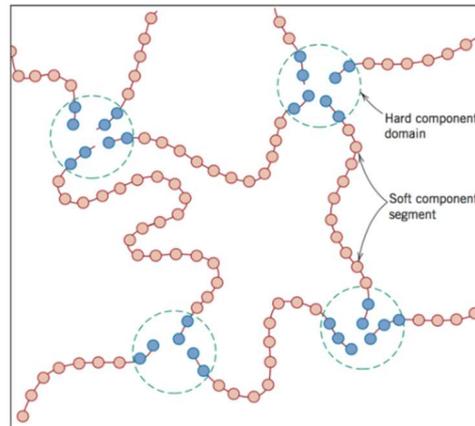


Figura 3.5 – Representação esquemática da estrutura molecular de um TPE. Em azul parte rígida e em laranja parte elástica. Adaptado de Callister, 2007.

3.3. MODELOS CONSTITUTIVOS

Relações constitutivas são empregadas para relacionar o estado de tensão com o estado de deformação para um tipo de material. Uma das relações mais clássicas criadas é a Lei de Hooke, que permite descrever o comportamento do material elástico conhecendo-se as propriedades módulo de elasticidade E e coeficiente de Poisson ν . Deste modo, o estado de tensões pode ser obtido através:

$$\sigma_{ij} = \frac{E}{1+\nu} \left(\varepsilon_{ij} + \frac{\nu}{1-2\nu} \varepsilon_{kk} \delta_{ij} \right) \quad (3.1)$$

onde σ é o tensor tensão de Cauchy e ε é o tensor deformação. No entanto, conforme discutido por Ward e Sweeney, 2013, e, alinhado com as discussões nos capítulos anteriores, os materiais poliméricos se distanciam deste comportamento exclusivamente linear e de pequenas deformações em várias aplicações.

Segundo Pascon, 2008, o modelo mais adequado para materiais elásticos altamente deformáveis é a chamada hiperelasticidade. Existem diversos modelos mecânicos hiperelásticos na literatura, porém todos eles podem ser agrupados em duas categorias. Conforme discutido por Marczak, 2006, os modelos fenomenológicos, são baseados na observação do comportamento do material durante testes, já modelos micromecânicos, foram desenvolvidos a partir de informações das reações químicas empregadas na fabricação do material. Os modelos fenomenológicos são geralmente mais utilizados em função da facilidade de obtenção de dados para caracterização do modelo, não sendo necessário conhecer todos os mecanismos químicos moleculares do material.

Os modelos hiperelásticos são modelos mais flexíveis na representação de materiais lineares e não lineares, e por isso, partem de equações constitutivas mais gerais como a elasticidade de Cauchy. O caso particular para sólidos hiperelásticos isotrópicos é dado por:

$$\sigma = -p\mathbf{I} + 2 \frac{\partial W}{\partial I_1} \mathbf{B} - 2 \frac{\partial W}{\partial I_2} \mathbf{B}^{-1} \quad (3.2)$$

onde p é a pressão hidrostática arbitrária obtida do equilíbrio do problema. Expressão na qual o tensor tensão σ é calculado a partir de uma função W , chamada de energia específica de

deformação ou energia livre de Helmholtz, e \mathbf{B} , que é o tensor deformação de Cauchy-Green à esquerda. I_1 e I_2 são o primeiro e segundo invariantes do tensor \mathbf{B} . Os modelos hiperelásticos mais comuns são baseados nos invariantes de deformação, a fim de dissociar as equações de um sistema de coordenadas em particular.

A escolha do modelo hiperelástico, representado por um potencial W , deve buscar representar o comportamento mecânico do material estudado. Um dos modelos mais celebrados de hiperelasticidade é o modelo proposto por Mooney e Rivlin em 1952. Existem muitas versões deste modelo, a situação para 2 termos descreve a energia de deformação como sendo:

$$W = C_1(\bar{I}_1 - 3) + C_2(\bar{I}_2 - 3) + \frac{1}{D}(J - 1)^2 \quad (3.3)$$

onde C_1 e C_2 são os parâmetros do material, \bar{I}_1 e \bar{I}_2 são o primeiro e segundo invariantes desviadores, D é definido como parâmetro de incompressibilidade e J é o determinante do tensor gradiente de deformação \mathbf{F} .

3.4. PROBLEMA INVERSO

A fim de se estudar o comportamento mecânico de componentes poliméricos e encontrar um modelo constitutivo que melhor represente o componente analisado, se faz necessária a utilização da técnica de solução de problemas inversos. Fazendo o uso de dados experimentais para a calibração dos modelos escolhidos. Em hiperelasticidade, raramente as constantes ajustadas para um único ensaio de tração axial serão iguais para diferentes solicitações sob o termoplástico, portanto devem ser realizados mais de um tipo de ensaio a fim de ajustar o modelo ao componente. Os ensaios de tração, cisalhamento puro e tração biaxial são os mais tradicionais para se caracterizar o comportamento hiperelástico de um material, porém de difícil execução neste problema.

O problema usual em mecânica dos sólidos consiste na determinação do campo de deslocamentos, deformações e tensões para um sólido com uma dada geometria, utilizando parâmetros constitutivos e condições de contorno bem-postas. Este tipo de problema é usualmente chamado na literatura de problema direto [Aster et al., 2011]. O problema inverso, como o nome sugere, é empregado quando se conhece o campo de deslocamentos e as condições de contorno, porém deseja-se obter os parâmetros que regem os modelos constitutivos adotados para representar o fenômeno.

Aqui, no presente trabalho, será tratada a abordagem com a estratégia *Finite Element Method Updating* (FEMU). Apesar do alto custo computacional, esta metodologia pode ser utilizada com qualquer tipo de dado experimental, não se limitando aos tradicionais ensaios de tração, cisalhamento puro e tensão biaxial. O FEMU consiste em minimizar uma função objetivo definida como a diferença entre a resposta mecânica obtida através dos experimentos e a

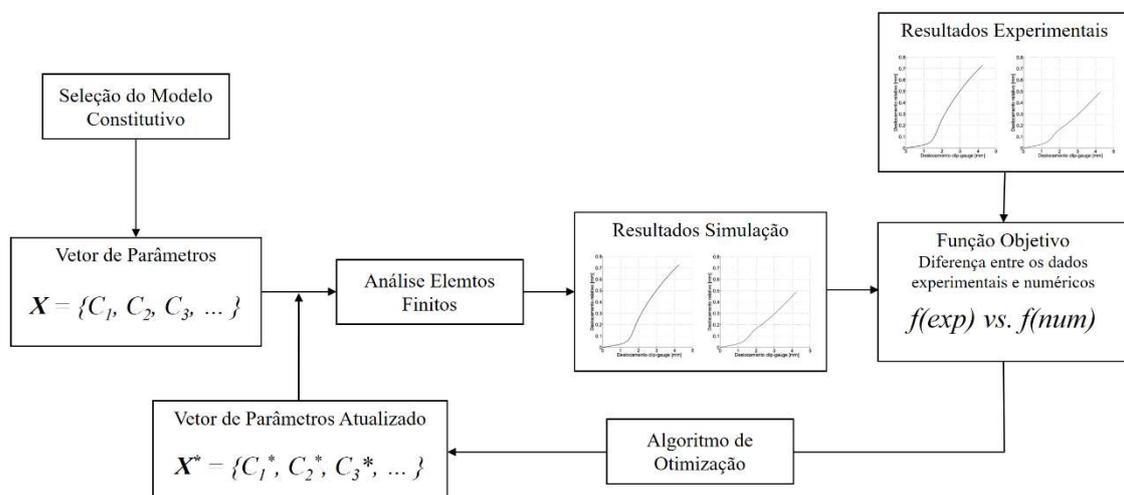


Figura 3.6 – Fluxograma da solução do problema inverso através do FEMU.

resposta mecânica obtida através da simulação numérica por elementos finitos utilizando um modelo constitutivo de interesse. Segundo a literatura, este modelo é de fácil implementação para as mais diversas aplicações, mesmo para geometrias complexas. O problema é resolvido uma vez que a diferença entre as repostas real e numérica está dentro dos limites aceitáveis estipulados pelo engenheiro, tendo como resposta, o conjunto de parâmetros do material para o modelo constitutivo adotado.

4. METODOLOGIA

A manga sob análise é um componente atualmente utilizado em veículos nacionais para conter a lubrificação de juntas homocinéticas fixas do tipo UF. Fabricada através do termoplástico Hytrel HTR8223 BK320 do fabricante DuPont, desenvolvido especialmente para a aplicação em mangas para semi-exos homocinéticos.

Conforme discutido nos capítulos anteriores, a identificação de parâmetros de modelos constitutivos que possam representar o comportamento da manga pode ser realizada seguindo-se três etapas.

1. Obtenção de respostas experimentais;
2. Simulação numérica computacional;
3. Resolução do problema inverso.

Independentemente do modelo adotado, faz-se necessária a obtenção de dados experimentais que servirão como dados de entrada para a caracterização. Posteriormente, deve ser desenvolvido um modelo em Elementos Finitos que represente a geometria do componente e reproduza as condições de contorno estipuladas durante os ensaios a fim de garantir respostas similares as encontradas na abordagem experimental. Por fim, escolhidos os modelos a serem testados, um algoritmo FEMU faz a identificação dos parâmetros constitutivos reduzindo a diferença entre as respostas numéricas e experimentais.

4.1. OBTENÇÃO DE RESPOSTAS EXPERIMENTAIS

As respostas experimentais foram obtidas através de três tipos de ensaios comportando assim diversos mecanismos de deformação no componente. Os ensaios propostos foram:

- a) Ensaio de tração utilizando a manga;
- b) Ensaio de torção utilizando a manga;
- c) Ensaio uniaxial de tração utilizando corpos de prova extraídos da manga

Todos os três tipos de ensaios foram realizados na *ElectroForce® 3200 Series III* existente no laboratório do Grupo de Mecânica Aplicada da UFRGS. Esta máquina é capaz de aplicar deslocamentos lineares com medição de força, e também, aplicar deslocamentos angulares com medição de torque. Porém, esta possui uma baixa capacidade de carga limitando o possível nível de deformações imposto neste estudo.

Para os ensaios (a) e (b) que utilizam a manga para obtenção de dados, foram usinados dois adaptadores que simulassem a interface do eixo e da junta de maneira similar àquela vista na aplicação, suas dimensões podem ser verificadas na figura 4.1. Para a fixação da manga nas interfaces, foram utilizadas abraçadeiras garantindo uma condição de não deslizamento da manga com relação aos adaptadores. A montagem do experimento (manga, adaptadores e abraçadeira) pode ser vista na figura 4.2 juntamente com as curvas experimentais obtidos nestes dois primeiros ensaios. Por limitações da máquina, foi imposto um deslocamento de até 5 mm no teste de tração. No teste de torção a limitação estava na magnitude do torque aplicado chegando a no máximo 3 N.m.

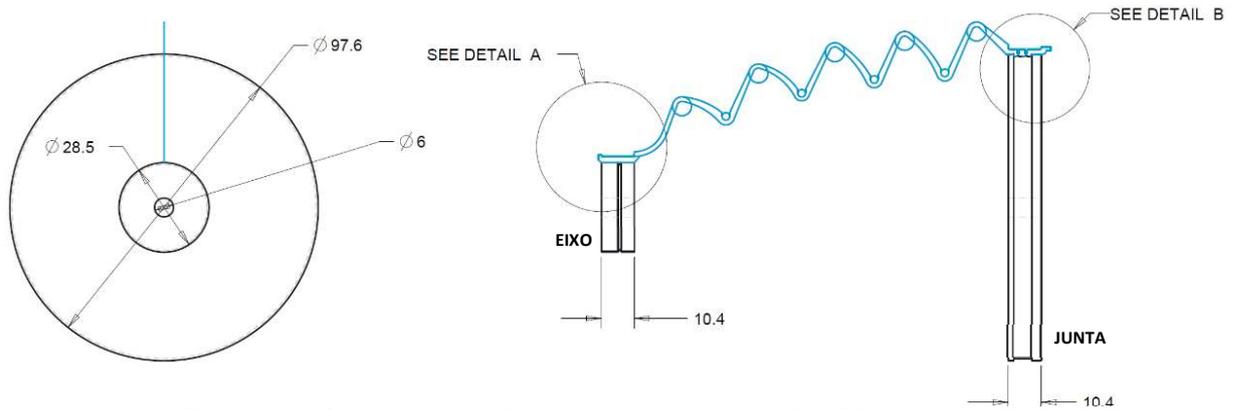


Figura 4.1 – Geometria dos adaptadores usinados em nylon. Dimensões e posição dos adaptadores das extremidades da junta e do eixo.

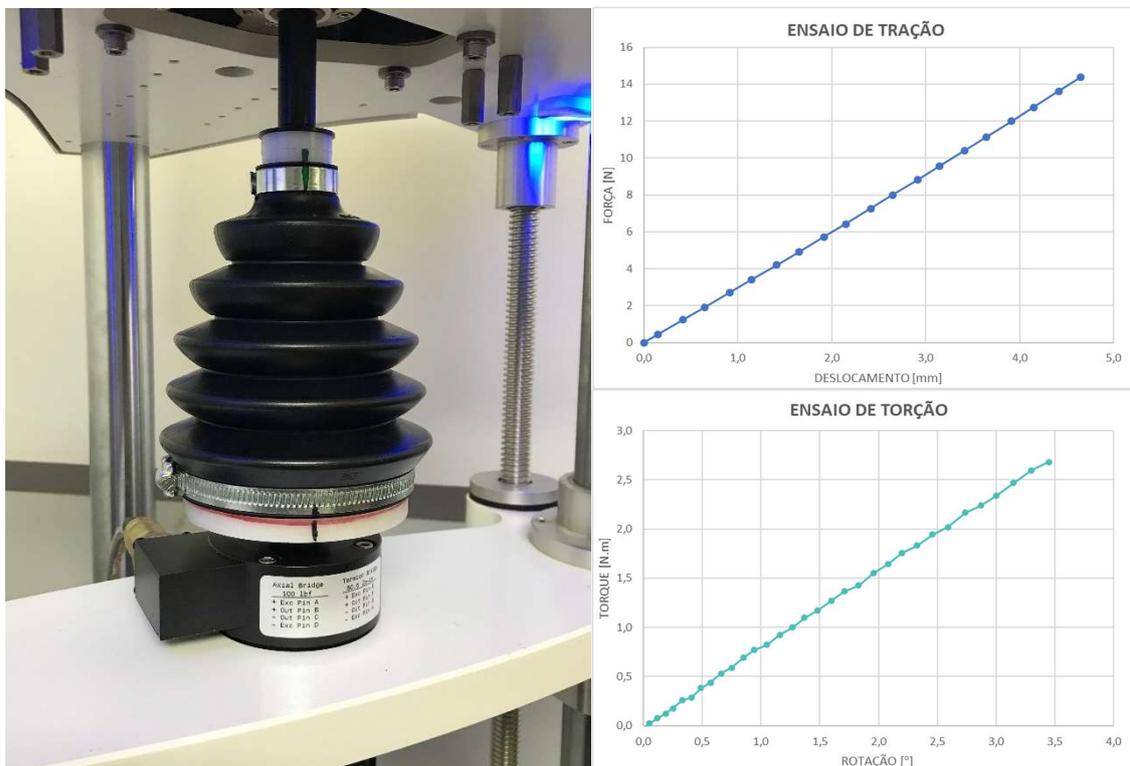


Figura 4.2 – À esquerda montagem do experimento (manga, adaptadores e abraçadeiras) na máquina para os ensaios, à direita resultados experimentais dos ensaios de tração e torção.

Para a realização do ensaio (c) de tração uniaxial, foi necessário extrair corpos de prova diretamente do componente acabado. Devido a geometria delicada do componente em análise foi definida uma geometria particular para corpos de prova distinta de normas usuais para testes uniaxiais. Foi confeccionado um molde aproveitando as dimensões existentes da manga e foram produzidos cinco corpos de prova com as dimensões especificadas na figura 4.3. Estes foram extraídos da maior convoluta da manga (próxima à extremidade da junta) por ser a região de maior área superficial. A espessura dos corpos de prova foi mantida como a espessura da manga naquela região.

Todos os corpos de prova tiveram suas dimensões registradas antes dos testes. Foi imposto um deslocamento de até 5 mm no teste de tração em função da limitação da máquina. Os dados de força e deslocamento providos pelo equipamento foram então convertidos para dados de tensão-deformação conforme a norma ASTM D638. A resposta tensão-deformação pode ser visualizada na figura 4.4 juntamente como uma imagem da execução do ensaio em um dos corpos de prova.

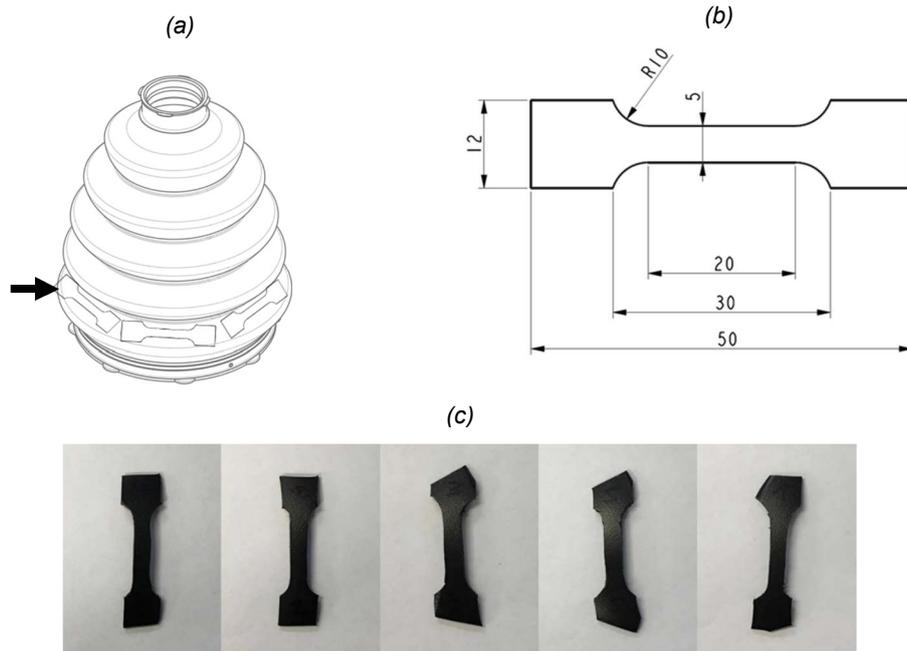


Figura 4.3 – (a) Região da manga de onde foram extraídos os corpos de prova, (b) dimensões principais dos corpos de prova, (c) Foto dos 5 corpos de prova retirados de uma manga.

No presente ensaio, o campo de deformações foi aproximado assumindo-se que toda a deformação se concentrou na região útil do corpo de prova (região de largura constante de 5 mm). O cálculo da tensão foi realizado utilizando-se os dados de força e área da secção dos corpos de prova.

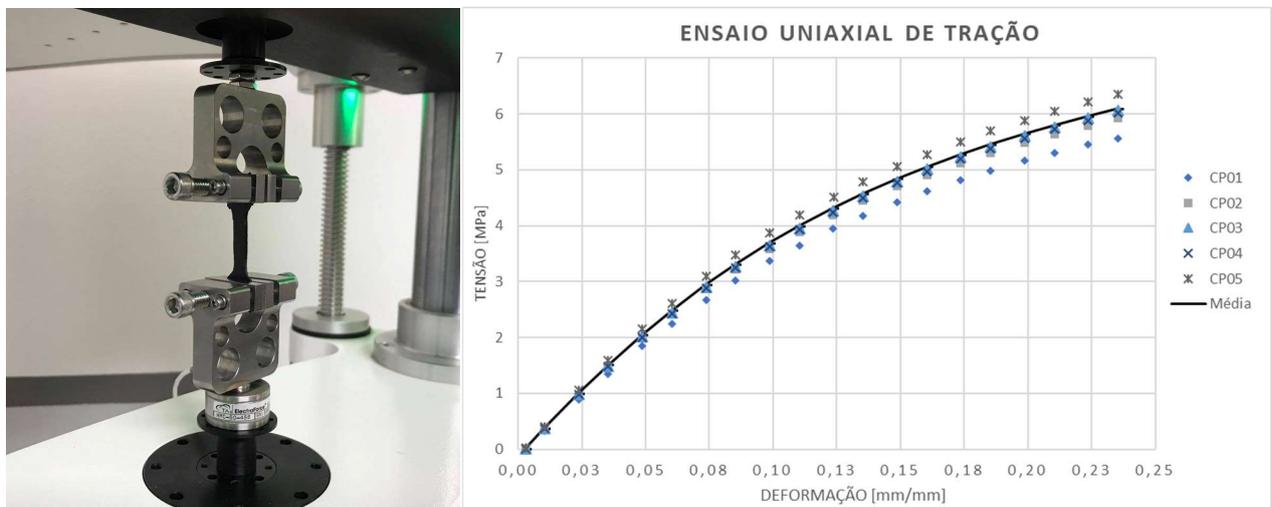


Figura 4.4 – À direita CP01 instalado entre garras antes do ensaio, à esquerda dados experimentais corrigidos incluindo uma média dos resultados

4.2. MODELO NUMÉRICO E CÁLCULO ANALÍTICO

A obtenção dos dados numéricos pode ser subdividida em duas partes. A primeira parte tenta reproduzir os testes de tração e torção que utilizaram a manga inteira na obtenção de dados, onde as condições testadas em laboratório foram reproduzidas virtualmente no software de elementos finitos ANSYS. Já a segunda parte tenta reproduzir a resposta experimental vinda do teste uniaxial de tração onde foi considerada a hipótese de deformações homogêneas. Uma vez que foi obtida uma curva tensão-deformação através do ensaio, um cálculo numérico será utilizado para reproduzir a resposta tensão-deformação uniaxial.

Para a reprodução dos testes de tração e torção, gerou-se uma malha estruturada contendo 89.232 elementos hexagonais SOLID186 (20 nós). A malha foi desenvolvida através do software comercial ICEM CFD, comumente utilizado em análises de volumes finitos, para obtenção de uma malha estruturada. A figura 4.5 mostra um corte na geometria e um detalhe da região com maior densidade de elementos.

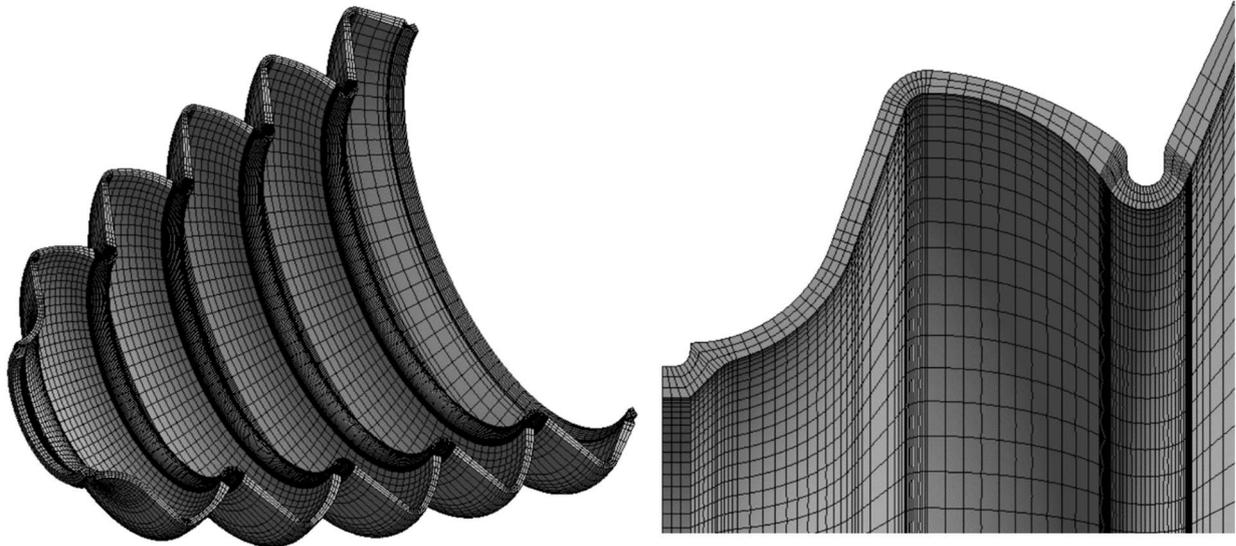


Figura 4.5 – Malha hexagonal gerada para realização da simulação. Seção mostrando o interior da geometria à direita. À esquerda detalhe das regiões com maior densidade de elementos.

Foram impostas as condições de contorno obtidas experimentalmente. Na simulação que reproduz o ensaio de tração do componente, foi fixada a extremidade do eixo e imposto um deslocamento na extremidade da junta. O mesmo sendo feito para a simulação de torção, porém imposta uma rotação na extremidade da junta. Para reduzir custo computacional, foram escolhidos 5 pontos para representar o comportamento mecânico dos componentes, e proceder com a obtenção dos parâmetros com FEMU.

Foram executadas simulações utilizando os modelos de Elasticidade Linear de Hooke e Hiperelasticidade Mooney-Rivlin de 2 parâmetros, ambos já implementados no ANSYS. Uma vez escolhido o modelo e seus parâmetros, foi implementado um algoritmo que executa o software de elementos finitos para obter resultados de força e de torque, segundo imposição dos deslocamentos e rotações observados experimentalmente. Para a implementação do FEMU (execução do problema de minimização que caracteriza numericamente o material) foi necessário parametrizar os parâmetros do material.

A segunda etapa da abordagem numérica tenta recriar a resposta de tensão-deformação obtida através do ensaio uniaxial de tração. Para isso utiliza-se um cálculo analítico das tensões em função das deformações para cada um dos modelos adotados conforme verificado na literatura. Para o modelo de Elasticidade Linear de Hooke o cálculo implementado descreve o componente uniaxial σ determinado através componente de deformação uniaxial ε pela expressão:

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \quad (4.1)$$

onde E é o módulo de elasticidade do material. No software de FEM esta relação escalar é substituída pela relação tensorial, agregando a dependência do Coeficiente de Poisson como parâmetro do material. Para o modelo hiperelástico de Mooney-Rivlin de 2 parâmetros, utilizou-se o cálculo analítico baseado na equação do campo de tensões de Cauchy, para o caso uniaxial de tensões e utilizando a hipótese de isocoricidade:

$$\boldsymbol{\sigma} = 2C_2 I_2 \mathbf{I} + 2C_1 \mathbf{B} - 2C_2 \mathbf{B}^{-1} \quad (4.2)$$

onde C_1 e C_2 são os parâmetros do material. Deste modo, é possível obter respostas numéricas representativas dos três casos realizados experimentalmente e que serão implementadas na próxima etapa da metodologia, a resolução do problema inverso.

4.3. IDENTIFICAÇÃO DOS PARÂMETROS

Neste trabalho utilizou-se a estratégia FEMU para a obtenção dos parâmetros dos modelos constitutivos onde buscou-se minimizar a função objetivo ϕ definida como o quadrado da diferença entre as respostas experimentais e numéricas para cada um dos casos utilizados, conforme as expressões:

$$\phi = \phi_F + \phi_T + \phi_\sigma \quad (4.3)$$

$$\phi = \sum_{i=1}^n \left(\frac{F_i^{exp} - F_i^{num}}{F_{máx}^{exp}} \right)^2 + \sum_{i=1}^n \left(\frac{T_i^{exp} - T_i^{num}}{T_{máx}^{exp}} \right)^2 + \sum_{i=1}^n \left(\frac{\sigma_i^{exp} - \sigma_i^{num}}{\sigma_{máx}^{exp}} \right)^2 \quad (4.4)$$

onde os índices *exp* e *num* representam respectivamente os dados experimentais e numéricos. F representa os dados de força para o caso de tração da manga, T representa os dados de torque para o caso de torção da manga e σ representa os dados de tensão para o caso de tração uniaxial. Os termos $F_{máx}^{exp}$, $T_{máx}^{exp}$ e $\sigma_{máx}^{exp}$ são os valores máximos verificados experimentalmente e são necessários para normalizar os valores dos resíduos individuais uma vez que as grandezas envolvidas em cada um dos casos testados são diferentes.

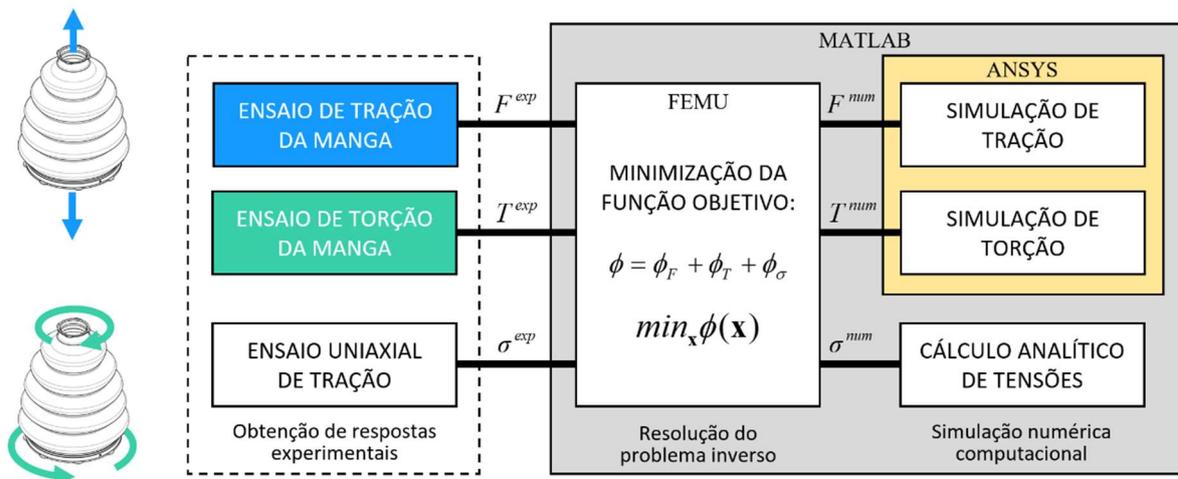


Figura 4.6 – Esquemática da metodologia adotada para a caracterização numérico-experimental da manga de termoplástico evidenciando as três etapas necessárias.

O algoritmo foi desenvolvido para se trabalhar com ambos os modelos constitutivos abordados. Este utiliza como dados de entrada as respostas experimentais dos três ensaios e um chute inicial dos parâmetros do modelo. Em seguida executa a simulação numérica obtendo dados que são então comparados através das expressões 4.3 e 4.4. Os parâmetros são encontrados quando o problema de otimização reduz a diferença entre as respostas *exp* e *num* alterando os parâmetros do material.

Para a minimização da função objetivo apresentada foi implementada uma rotina no software MATLAB, que faz uso do método Nelder-Mead Simplex. Foram determinados parâmetros de convergência $TolY$ (tolerância sobre a variação da função objetivo) e $TolX$ (tolerância sobre a variação da dos parâmetros a serem identificados) responsáveis por determinar a convergência do algoritmo conforme as expressões:

$$TolY = \phi^i - \phi^{i-1} = 10^{-2} \quad (4.5)$$

$$TolX = \mathbf{X}^i - \mathbf{X}^{i-1} = 10^{-2} \quad (4.6)$$

onde o índice i representa a iteração atual, ϕ é a função objetivo definida na equação 4.4 e \mathbf{X} é o vetor de parâmetros do modelo.

Dependendo da estratégia de caracterização a ser estudada, pode-se adotar apenas algumas das respostas experimentais obtidas, desconsiderando a contribuição de ϕ_F , ϕ_T ou ϕ_σ em ϕ . Neste sentido serão estudados dois casos, considerando apenas as respostas experimentais obtidas sobre os componentes e em segunda análise considerando todas as respostas obtidas.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nesta seção serão apresentados os resultados obtidos através da implementação da metodologia discutida anteriormente avaliando a representatividade dos modelos de Elasticidade Linear e Mooney-Rivlin em dois casos de estudo. Os diferentes modelos serão avaliados com respeito a capacidade de representação dos dados experimentais adquiridos através da função objetivo ϕ definida anteriormente.

Foram analisados dois estudos implementando a metodologia discutida. O primeiro representando apenas os ensaios que utilizaram o componente final e o segundo analisando a representação dos modelos utilizando as três respostas experimentais.

ESTUDO 1:

Este estudo utilizou apenas as informações relativas aos ensaios sobre os componentes. Foram investigados ambos o módulo de elasticidade e o coeficiente de Poisson para o caso elástico linear, e os parâmetros C_1 e C_2 para o modelo hiperelástico. Nesta abordagem, o modelo elástico linear apresentou $\phi=0,027$ e o modelo hiperelástico de Mooney-Rivlin apresentou $\phi=1,47E-3$. O módulo de elasticidade e o Poisson encontrados foram $E=76,43$ MPa e $\nu=0,412$ para o modelo de Elasticidade Linear. O valor do módulo de elasticidade obtido é condizente com o encontrado em literatura [Matweb, 2017]. Não foram encontrados valores para comparação do coeficiente de Poisson. Os coeficientes do modelo de Mooney-Rivlin foram $C_1=-11,106$ MPa e $C_2=23,592$ MPa. As repostas individuais são apresentadas na figura 5.1 onde percebe-se uma representação satisfatória para ambos os modelos.

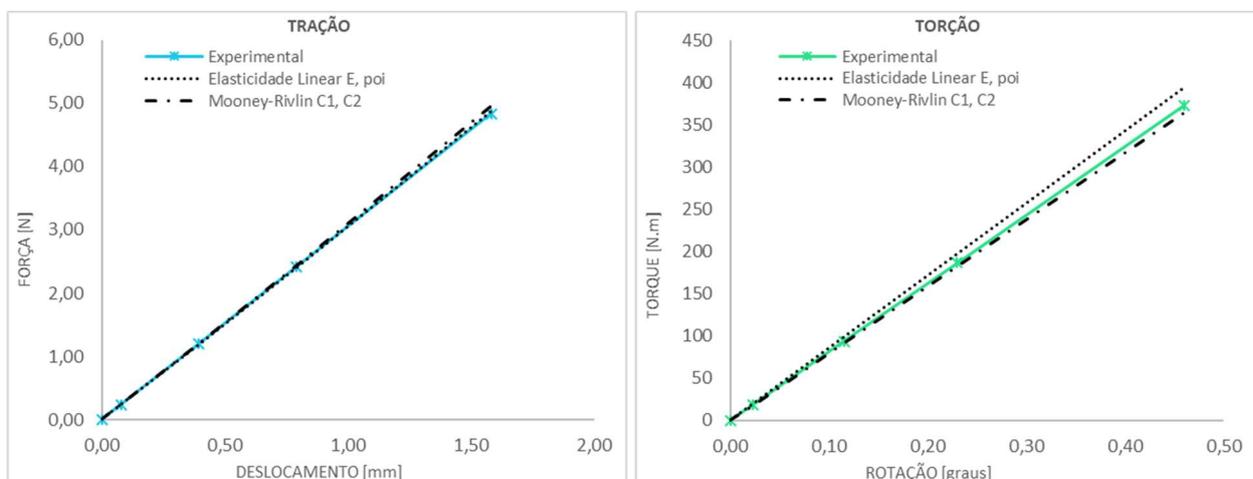


Figura 5.1 – Gráficos mostrando as melhores respostas obtidas para os modelos de Elasticidade Linear e Mooney-Rivlin para os ensaios de tração e torção.

Ambos os modelos se mostraram capazes de representar o material para o nível de deformação percebido durante os ensaios do componente com destaque ao modelo de Mooney-Rivlin, que conseguiu minimizar a função objetivo além do percebido no modelo de Elasticidade Linear. Deve-se observar que o nível de deformação na simulação numérica da máxima principal foi de 0,9%. As respostas da análise por elementos finitos podem ser verificadas com detalhe no Apêndice A.

ESTUDO 2:

Para a identificação dos parâmetros neste estudo, foram consideradas as três respostas experimentais ϕ_F , ϕ_T e ϕ_σ . Destaca-se o fato de que no ensaio uniaxial foi possível atingir outros níveis de deformação (23%) até então não explorados no primeiro estudo. Uma vez que o modelo elástico não é capaz de representar a resposta não linear presente no ensaio uniaxial, neste estudo utilizou-se uma abordagem apenas com o modelo hiperelástico de Mooney-Rivlin, capaz de obter respostas não lineares, onde tentou obter os valores para as constantes do material C_1 e C_2 .

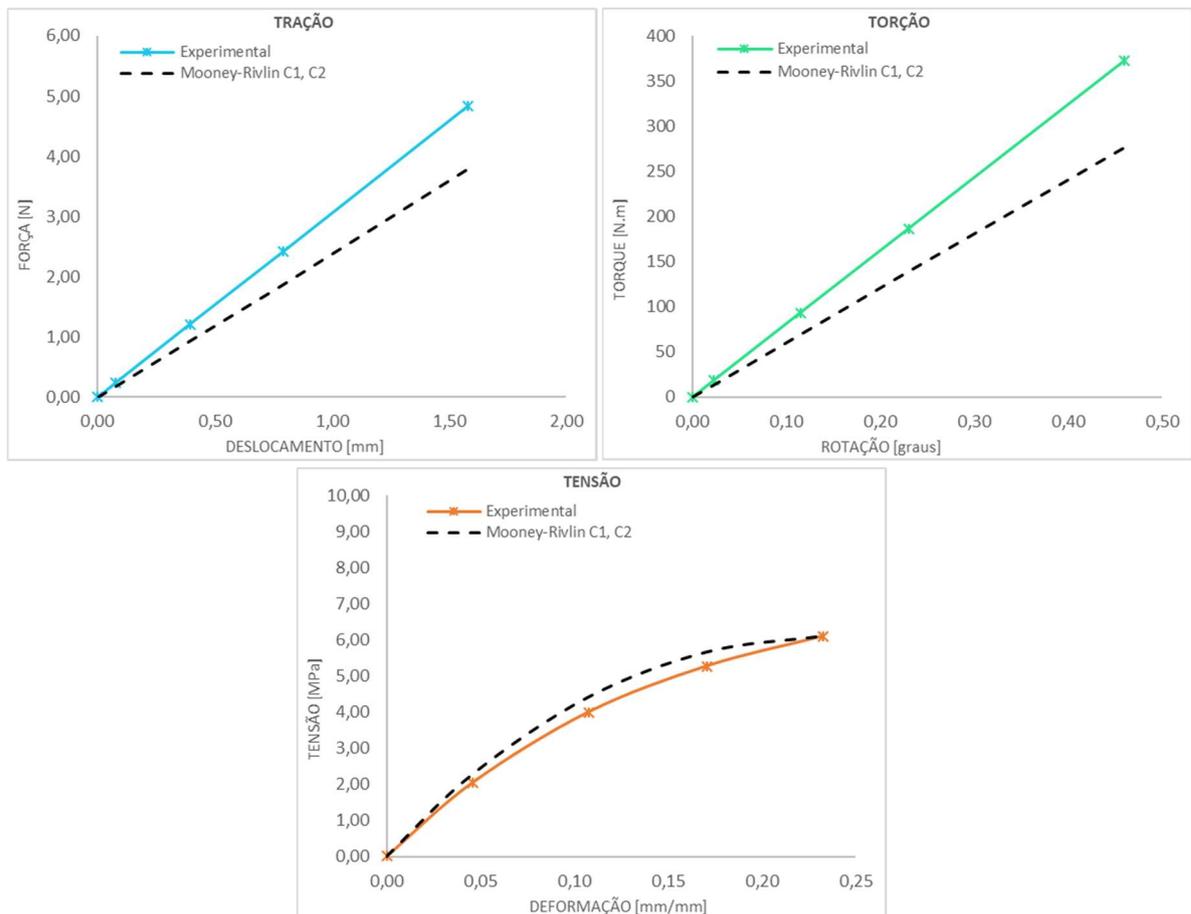


Figura 5.2 – Gráficos mostrando as melhores respostas obtidas para o modelo de Mooney-Rivlin para os ensaios de tração, torção e tração uniaxial.

O modelo de Mooney-Rivlin conseguiu atingir um valor para a função objetivo de $\phi=0,1769$, acima do constatado no primeiro estudo. Os coeficientes encontrados foram $C_1 = -17,922$ MPa e $C_2 = 27,419$ MPa. Na figura 5.2 é possível verificar o resultado para as respostas individuais dos testes de tração, torção e tração uniaxial.

O modelo de Mooney-Rivlin não consegue garantir uma resposta satisfatória para as três respostas simultaneamente, apesar de ser adequado para grandes deformações. Outros modelos hiperelásticos podem ser explorados para esta representação.

As respostas do processo de minimização para cada um dos modelos abordados nos dois estudos podem ser verificadas na figura 5.3. O gráfico mostra os valores obtidos no cálculo da função objetivo ϕ e evidencia a magnitude dos resultados mostrando a diferença de representatividade entre as situações abordadas.

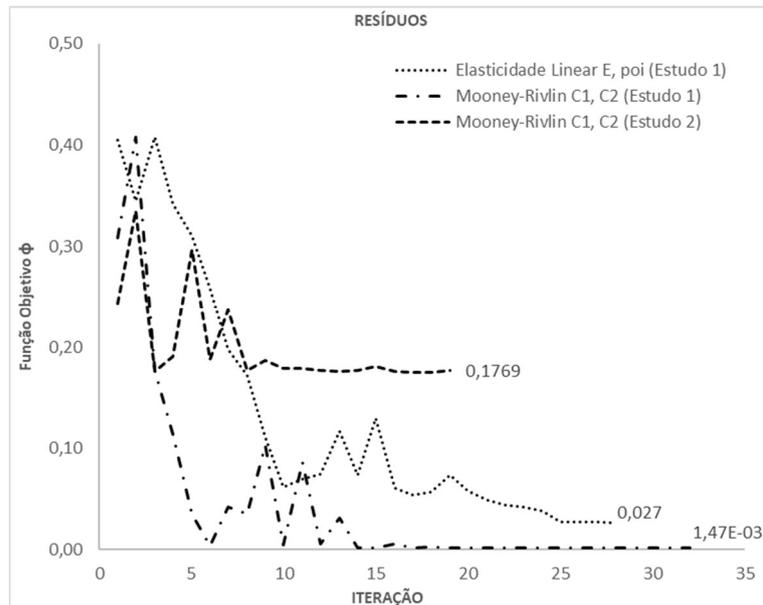


Figura 5.3 – Gráfico mostrando comparação dos valores obtidos para a função objetivo ϕ para os modelos de Elasticidade Linear e Mooney-Rivlin em ambos os casos analisados.

6. CONCLUSÃO

Através desta metodologia foi possível obter parâmetros de material, que caracterizam os modelos estudados, através de dados obtidos sobre o componente considerando sua geometria e o material resultante do processo de fabricação. No presente trabalho foram apresentados os resultados da representação do comportamento mecânico de mangas de termoplástico através de modelos constitutivos de Elasticidade Linear e de Mooney-Rivlin (2 parâmetros) através de um algoritmo FEMU.

Através dos resultados do primeiro estudo, observou-se que os modelos constitutivos de Elasticidade Linear e de Mooney-Rivlin foram capazes de representar o comportamento do componente para os testes realizados. Concluindo-se que ambos os modelos são suficientes para reproduzir comportamentos com baixos níveis de deformação (0,9% de deformação principal).

Nos resultados do segundo estudo, o modelo de Mooney-Rivlin mostrou capacidade de representar respostas sob grandes deformações percebidas no teste uniaxial. Pôde-se verificar que o desempenho do modelo constitutivo não foi satisfatório na representação do componente levando-se em consideração todas as respostas mecânicas simultaneamente. A dificuldade observada pode estar associada a incapacidade de representação do modelo constitutivo ou ainda, a dificuldades técnicas na execução dos testes experimentais. Fazendo-se necessária uma investigação com maior profundidade no tratamento sob grandes deformações, com diferentes modelos hiperelásticos. Neste segundo estudo não foi utilizado o modelo elástico linear pois este não é capaz de representar a resposta não linear observada experimentalmente.

Os objetivos do presente trabalho foram atingidos uma vez que foi desenvolvida e testada a metodologia proposta determinando um conjunto de parâmetros que melhor representa o componente. Importante salientar também que esta análise pode ser implementada a diferentes componentes e materiais a depender da necessidade. Propõe-se para trabalhos futuros uma investigação aprofundada no comportamento deste tipo de componente, a fim de se explorar os mecanismos de deformação que sejam importantes na resposta mecânica.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANSYS, Inc. **“ANSYS Mechanical User Guide”**, U.S.A., Release 15.0, 2013.
- Aster, R.; Borchers, B. e Thurber, C.; **“Parameter Estimation and Inverse Problems”**. Textbook at University of Wisconsin, 2002-2003.
- Bresolin, F. L.; **“Um estudo de diferentes modelos constitutivos para caracterização mecânica de materiais termoplásticos submetidos a deformações finitas”**, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2016.
- Callister, W. D.; **“Materials Science and Engineering”**, Wiley, 7th edition, 2007.
- Crawford, R. J., **“Plastics Engineering”**, Elsevier Ltd, Third Edition, 1998.
- DuPont, **“Hytrell Product Guide”**, <http://www.dupont.com>. Acessado em 03/05/2017.
- Klompfen, E. T. J.; **“Mechanical properties of solid polymers: constitutive modelling of long and short term behaviour”** Eindhoven: Technische Universiteit Eindhoven, 2005.
- Madenci, E. e Guven, I.; **“The Finite Element Method and Applications in Engineering Using ANSYS”**. Springer, 2nd edition, 2015.
- Marczak, R. J.; Gheller Jr., J. e Hoss, L.; **“Caracterização De Elastômeros Para Simulação Numérica”**, São Leopoldo, Centro Tecnológico de Polímeros, 2006.
- Matweb, **“DuPont Performance Polymers Hytrell HTR8223 BK320 TPC-ET”**, <http://www.matweb.com/search>. Acesso em 04/06/2017
- Neto, E. S.; **“Computational Methods for Plasticity”**, Wiley, 2008.
- Nielsen, L. E. e Landel R. F.; **“Mechanical Properties of Polymers and Composites”**, CRC Press, Second Edition 1993
- Pascon, J. P.; **“Modelos constitutivos para materiais hiperelásticos: estudo e implementação computacional”**. Dissertação de Mestrado, Universidade de São Paulo, 2008.
- Pieburg, B. e Amborn, P.; **“Constant-Velocity Driveshafts for Passenger Cars”**, verlag moderne industrie, 1998.
- Roesler, C. R. M.; Salmoria, G. V.; Moré, A. D. O.; Vassoler. J. M. e Fancello, E. A.; **“Torsion test method for mechanical characterization of PLDLA 70/30 ACL interference screws”**, Elsevier Ltd., Polymer Testing, 2014
- SO.F.TER. GROUP, **“Thermoplastic Copolyester Elastomer Pibiflex”**, <http://www.softergroup.com>. Acessado em 04/05/2017
- Vassoler, J. M.; **“Modelos constitutivos variacionais de viscoelasticidade e viscoplasticidade para materiais termoplásticos submetidos a deformações finitas”**, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2007
- Ward, I. M. e Sweeney, J.; **“Mechanical Properties of Solid Polymers”**, Wiley, 3rd edition, 2013.

APÊNDICE A

Neste apêndice estão representadas as respostas em elementos finitos para a melhor situação observada. Modelo de Mooney-Rivlin (2 Parâmetros) $C_1 = -11,106$ MPa e $C_2 = 23,592$ MPa. Resultados de deslocamento para os ensaios de tração e torção da manga.

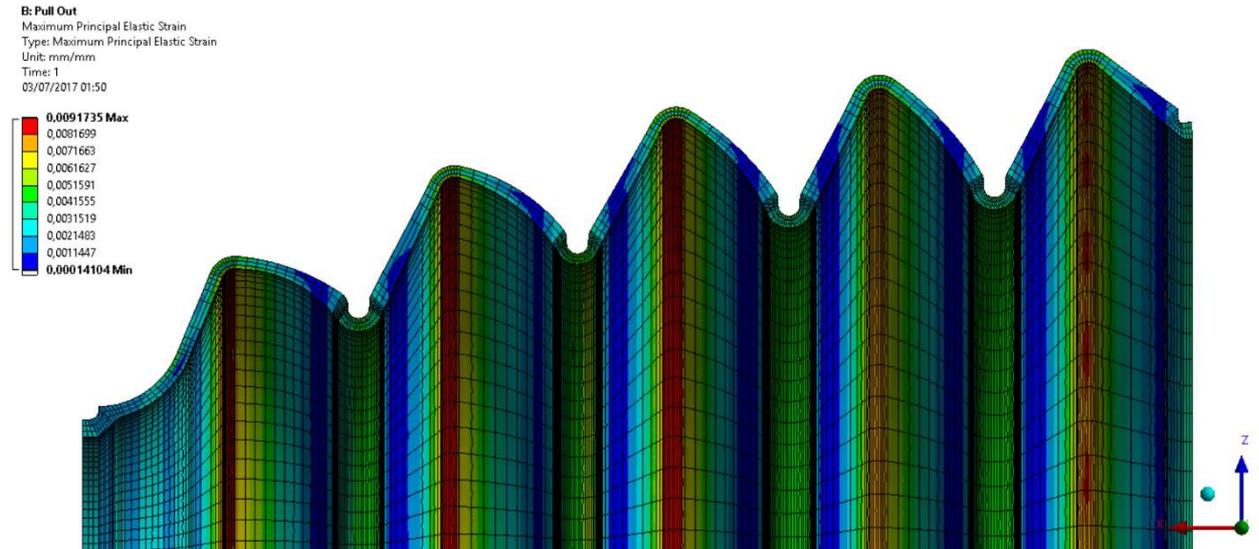


Figura A.1 – Resultado para a deformação máxima principal na simulação de tração do componente.

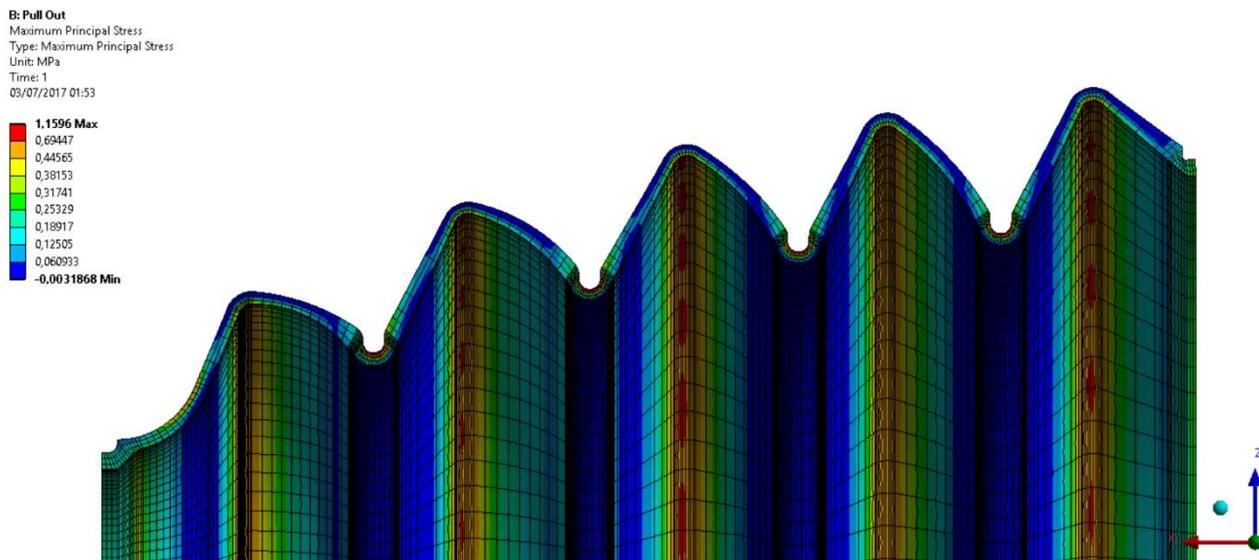


Figura A.2 – Resultado para a tensão máxima principal na simulação de tração do componente.

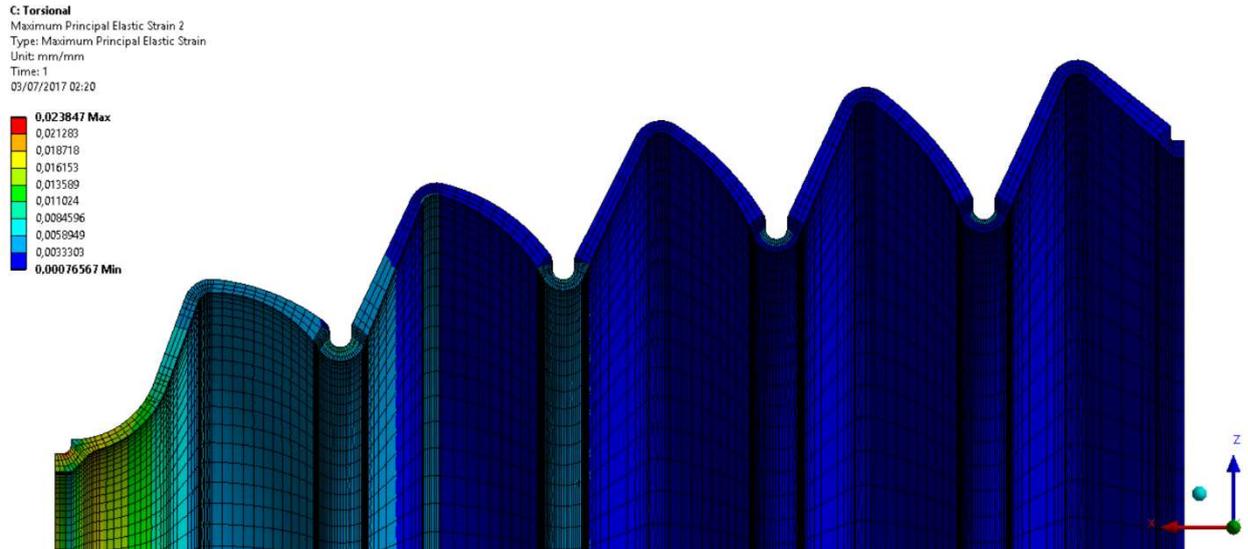


Figura A.3 – Resultado para a deformação máxima principal na simulação de torção do componente.

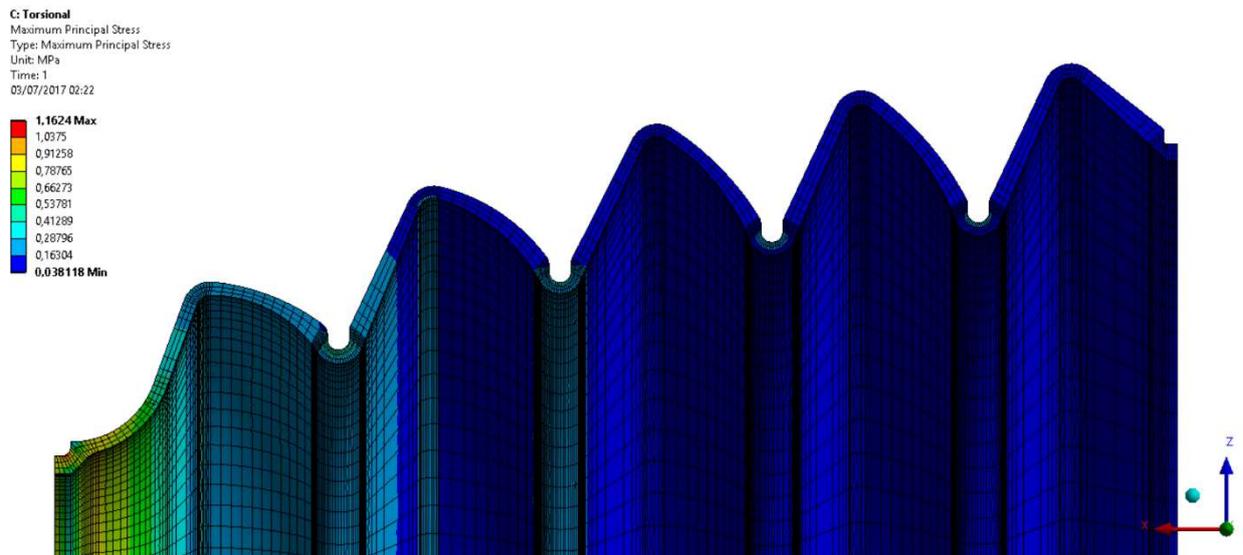


Figura A.4 – Resultado para a tensão máxima principal na simulação de torção do componente.