

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA DE MATERIAIS - MESTRADO PROFISSIONAL

**Estudo Experimental do Comportamento Viscoelástico Não Linear de Buchas
de Borracha Sob Solicitações Estáticas e Dinâmicas**

Angelo de Souza

Itajubá, Abril de 2013

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA DE MATERIAIS - MESTRADO PROFISSIONAL

Angelo de Souza

**Estudo Experimental do Comportamento Viscoelástico Não Linear de Buchas
de Borracha Sob Solicitações Estáticas e Dinâmicas**

**Dissertação submetida ao Programa de Pós-
Graduação em Engenharia de Materiais – Mestrado
Profissional como parte dos requisitos para
obtenção do Título de Mestre em Engenharia de
Materiais – Mestrado Profissional.**

**Área de Concentração: Desenvolvimento, processamento e caracterização de
materiais.**

Orientador: Prof. Dr. José Célio Dias

Co-orientador: Prof. Dr. Antonio Carlos Ancelotti Junior

Itajubá, Abril de 2013

Itajubá

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA DE MATERIAIS - MESTRADO PROFISSIONAL

Angelo de Souza

**Estudo Experimental do Comportamento Viscoelástico Não Linear de Buchas
de Borracha Sob Solicitações Estáticas e Dinâmicas**

Dissertação aprovada por banca examinadora em 30 de abril de 2013, conferindo ao autor o Título de ***Mestre em Engenharia de Materiais – Mestrado Profissional.***

Banca Examinadora:

Prof. Dr. José Célio Dias

Prof. Dr. Antonio Carlos Ancelotti Junior

Prof. Dr. José Juliano de Lima Junior

Prof. Dr. Clodoaldo saron

Itajubá

2013

Publicações geradas durante o desenvolvimento desta dissertação

Souza, A., Dias, J. C. (2011), “Comportamento Dinâmico de Buchas Elastoméricas”, XXXII CBRAVIC, Congresso Brasileiro de Aplicações do Vácuo na Indústria e na Ciência e o Latin display 2011, Itajubá – Minas Gerais – Brasil.

Souza, A., Dias, J. C., Ancelotti Jr, A. C. (2012), “Estudo Experimental de Buchas de Borracha Submetida a Modos Acoplados de Solicitações Torcional-Axial”, Anais do CONEM-2012, VII Congresso Nacional de Engenharia Mecânica, São Luís – Maranhão – Brasil.

Souza, A., Dias, J. C., Ancelotti Jr, A. C. (2012), “Estudo Experimental das Características Mecânicas de Buchas de Borracha Sob Condições de Excitações Axiais”, Anais do CONEM-2012, VII Congresso Nacional de Engenharia Mecânica, São Luís – Maranhão – Brasil.

Souza, A., Dias, J. C., Ancelotti Jr, A. C. (2012), “Comportamento Mecânico de Buchas de Borracha Sob Modos Acoplados Axial-Torcional - Avaliação Experimental”, Anais do III CAIM 2012, Terceiro Congresso Argentino de Engenharia Mecânica, Buenos Aires – Argentina.

Souza, A., Dias, J. C., Ancelotti Jr, A. C. (2012), “Estudo Experimental do Comportamento Viscoelástico Não Linear de Buchas de Borracha para o Modo de Deformação Axial”, Anais do III CAIM 2012, Terceiro Congresso Argentino de Engenharia Mecânica, Buenos Aires – Argentina.

Souza, A., Dias, J. C., Ancelotti Jr, A. C. (2012), “Estudo Experimental do Comportamento Viscoelástico Não Linear de Buchas de Borracha para o Modo de Deformação Torcional”, Anais do III CAIM 2012, Terceiro Congresso Argentino de Engenharia Mecânica, Buenos Aires – Argentina.

Dedicatória

*A meu pai Afonso de Souza
e a minha mãe
Maria das Dores Ribeiro de Souza.*

Agradecimentos

Ao meu Orientador, Prof. Dr. José Celio Dias pela competência, dedicação, paciência e amizade.

Ao meu Co-orientador, Prof. Dr. Antonio Carlos Ancelotti Junior, pelo incentivo colaboração e amizade.

Aos Professores da Universidade Federal de Itajubá, Prof. Dr. José Juliano de Lima Junior e Profa. Dra. Mirian de Luordes Motta Melo, pelo apoio e valiosas sugestões, que contribuíram para a elaboração deste trabalho.

Aos colegas técnicos de laboratório pelo permanente incentivo, colaboração, amizade, momentos de lazer e inesquecível convívio profissional.

Ao Instituto de Engenharia Mecânica da UNIFEI, representado pelos seus dedicados Professores e Funcionários, pela oportunidade que me concedeu na realização deste trabalho, e aos amigos desse Instituto, pelo convívio profissional.

Aos meus pais, Afonso e Maria, que sempre me incentivaram na formação e no desenvolvimento cultural.

Resumo

Souza, A. (2013), *Estudo Experimental do Comportamento Viscoelástico Não Linear de Buchas de Borracha Sob Solicitações Estáticas e Dinâmicas, Itajubá - MG, 99p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais – Mestrado profissional) - Instituto de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Itajubá.*

Os materiais poliméricos passaram a ocupar um lugar de destaque dentre os materiais utilizados na indústria automotiva, devido a razões econômicas e tecnológicas. Em algumas aplicações da indústria automotiva os polímeros são fundamentais em virtude de suas características e propriedades específicas, sendo em alguns casos, um material insubstituível. Os elastômeros são exemplos destes materiais ditos insubstituíveis. Em determinadas aplicações, a característica intrínseca de uma borracha, capaz de suportar grandes deformações reversíveis sobre tensão aplicada, torna um tanto particular sua utilização na indústria automotiva. Uma aplicação típica para as borrachas é em buchas de borracha utilizadas em sistemas de suspensão e que é o objeto de estudo desta dissertação. Apresenta-se um estudo experimental do comportamento mecânico de uma bucha de borracha comercialmente disponível, sob solicitações estáticas e dinâmicas, para os modos de deformação axial, torcional, radial e acoplados modos de deformação axial-torcional. Os resultados indicam o quanto à resposta da bucha de borracha a solicitações estáticas e dinâmicas é dependente da taxa de aplicação da deformação e amplitudes de deformação diferentes. Os resultados indicam também que a resposta mecânica da bucha de borracha para uma solicitação torcional é significativamente afetada pela quantidade de solicitação axial acoplada.

Palavras-chave

Buchas de borracha, Comportamento viscoelástico, Resposta não linear, Ensaio dinâmico.

Abstract

Souza, A. (2013), *Experimental Study of the Viscoelastic Behavior of Nonlinear Rubber Bushes Under Static and Dynamic Applications*, Itajubá - MG, 99p. *Dissertation (MSc in Materials Engineering - Master Professional) - Institute of Mechanical Engineering, Federal University of Itajubá.*

Polymeric materials have been widely considered among the different types of materials used in the automotive industry, mainly due to economic and technological reasons. In the automotive industries polymers are considered irreplaceable materials due its unique and important characteristics. Among the polymers materials, the elastomers are examples of these irreplaceable materials. In certain applications, the intrinsic characteristic of a rubber that can withstand large and reversible deformations under loading, becomes somewhat particular its use in the automotive industry. A typical rubber application refers to rubber bushings which are used in automotive suspension systems. This work presents an experimental study regarding the mechanical behavior of a rubber bushing commercially available under static and dynamic loading. For this study, the following deformation modes were considered for both static and dynamic loading: axial, torsional, radial and deformation modes of axial-torsion coupled. The test results show how response to static and dynamic loading of rubber bushing is dependent upon the application rate and amplitudes of deformation. The results also show that the mechanical response of the rubber bush under a torsional loading is significantly affected by the amount of axial loading coupled.

Keywords

Rubber bushings, Viscoelastic behavior, Nonlinear response, Dynamic tests.

Sumário

| | |
|--|----|
| SUMÁRIO..... | I |
| LISTA DE FIGURAS..... | IV |
| LISTA DE TABELAS..... | X |
| CAPÍTULO 1..... | 1 |
| INTRODUÇÃO..... | 1 |
| 1.1 Considerações Iniciais..... | 1 |
| 1.2 Motivação e Justificativas para o Trabalho..... | 6 |
| 1.3 Objetivos..... | 7 |
| 1.4 Estrutura da Dissertação..... | 7 |
| CAPÍTULO 2..... | 9 |
| REVISÃO DA LITERATURA..... | 9 |
| 2.1 Síntese Histórica da Borracha Natural..... | 9 |
| 2.2 Coleta e Processamento do Látex..... | 12 |
| 2.3 Preparação dos Compostos..... | 14 |
| 2.4 Vulcanização..... | 15 |
| 2.4.1 Vulcanização por Enxofre..... | 20 |
| 2.5 Adesão de Borracha a Substratos..... | 20 |
| 2.6 Confeção de Buchas de Borracha..... | 22 |
| 2.7 Tipos Básicos de Buchas de Borracha..... | 23 |
| 2.8 Propriedades do Material..... | 25 |
| 2.8.1 Estrutura Molecular..... | 25 |
| 2.8.2 Viscoelasticidade..... | 26 |
| 2.8.3 Amortecimento e Módulo Dinâmico..... | 28 |
| 2.8.4 Dependência da Taxa de Aplicação da Carga..... | 30 |
| 2.8.5 Dependência da Temperatura..... | 32 |
| 2.8.6 Dependência da Amplitude de Deformação..... | 33 |
| 2.8.7 Efeito Mullins..... | 35 |
| 2.8.8 Efeito das Cargas..... | 36 |

| | |
|--|----|
| 2.8.9 Efeito da Vulcanização Sobre as Propriedades do Elastômero..... | 38 |
| 2.8.10 Influências da Massa Molar e Distribuição da Massa Molar..... | 40 |
| 2.8.11 Outras Propriedades..... | 40 |
| CAPÍTULO 3..... | 42 |
| MATERIAS E MÉTODOS..... | 42 |
| 3.1 Objeto de Estudo..... | 42 |
| 3.2 Instalações Experimentais..... | 43 |
| 3.3 Sistema de Coordenadas Utilizado..... | 45 |
| 3.4 Condicionamento Mecânico das Buchas de Borracha para Realização dos Ensaio..... | 46 |
| 3.5 Metodologia Experimental..... | 47 |
| 3.5.1 Ensaio Estático..... | 47 |
| 3.5.1.1 Ensaio Estático para o Modo de Deformação Axial..... | 48 |
| 3.5.1.2 Ensaio Estático para o Modo de Deformação Torcional..... | 48 |
| 3.5.1.3 Ensaio Estático para o Modo de Deformação Radial..... | 49 |
| 3.5.1.3 Ensaio Estático para o Modo de Deformação Axial-Torcional Acoplado..... | 50 |
| 3.5.2 Ensaio Dinâmico..... | 51 |
| 3.5.2.1 Ensaio Dinâmico para o Modo de Deformação Axial..... | 52 |
| 3.5.2.2 Ensaio Dinâmico para o Modo de Deformação Torcional..... | 52 |
| 3.5.2.3 Ensaio Dinâmico para o Modo de Deformação Radial..... | 53 |
| 3.5.2.4 Ensaio Dinâmico para o Modo de Deformação Axial-Torcional Acoplado..... | 53 |
| CAPÍTULO 4..... | 55 |
| RESULTADOS E DISCUSSÕES..... | 55 |
| 4.1 Resultados dos Ensaio Estático..... | 55 |
| 4.1.1 Resultados dos Ensaio Estático para o Modo de Deformação Axial..... | 55 |
| 4.1.2 Resultados dos Ensaio Estático para o Modo de Deformação Torcional..... | 62 |
| 4.1.3 Resultados dos Ensaio Estático para o Modo de Deformação Radial..... | 68 |

| | |
|--|-----|
| 4.1.4 Resultados dos Ensaios Estáticos para o Modo de Deformação Axial-Torcional Acoplado..... | 74 |
| 4.2 Resultados dos Ensaios Dinâmicos..... | 82 |
| 4.2.1 Resultados dos Ensaios Dinâmicos para o Modo de Deformação Axial..... | 82 |
| 4.2.2 Resultados dos Ensaios Dinâmicos para o Modo de Deformação Torcional.... | 88 |
| 4.2.3 Resultados dos Ensaios Dinâmicos para o Modo de Deformação Radial..... | 94 |
| 4.2.4 Resultados dos Ensaios Dinâmicos para o Modo de Deformação Axial-Torcional Acoplado..... | 100 |
| CAPÍTULO 5..... | 106 |
| CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA PRÓXIMOS TRABALHOS..... | 106 |
| 5.1 Conclusões..... | 106 |
| 5.2 Sugestões para Próximos Trabalhos..... | 108 |
| REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS..... | 109 |

Lista de Figuras

| | |
|---|----|
| Figura 1 - Bucha de borracha..... | 3 |
| Figura 2 - Quatro modos de deformações padrão..... | 4 |
| Figura 3 - Estrutura química da borracha natural..... | 12 |
| Figura 4 - Extração do látex..... | 12 |
| Figura 5 - Cadeias Moleculares de uma borracha não vulcanizada, em (a) antes da aplicação de uma deformação e em (b) após a aplicação de uma deformação..... | 16 |
| Figura 6 - Comportamento das cadeias moleculares de uma borracha vulcanizada sobre a aplicação e retirada de uma força..... | 16 |
| Figura 7 - Representação esquemática de ligações cruzadas entre cadeias por pontes de enxofre. Borracha não vulcanizada (a) e vulcanizada (b)..... | 17 |
| Figura 8 - Tipos de ligação que podem ser formadas entre o enxofre e a borracha natural. a) ligação na cadeia principal de duas macromoléculas de borracha R - R' com 1 enxofre (monossulfeto S), 2 enxofres (dissulfeto S ₂), e x enxofres (polissulfeto S _x); b) ligação em que o enxofre e o acelerador estão pendurados na cadeia principal R; c) ligações mono e dissulfeto cíclicos (extrareticulares) R - R e R' - R'..... | 18 |
| Figura 9 - Curvas de tensão-deformação até 600% de alongamento para uma borracha natural tanto não vulcanizada quanto vulcanizada..... | 19 |
| Figura 10 (a,b,c,d) – Substratos metálicos aderidos a borracha por meio de vulcanização..... | 21 |
| Figura 11 – Exemplo de bucha moldada..... | 23 |
| Figura 12 – Exemplo de bucha de dois tubos..... | 24 |
| Figura 13 – Exemplo de bucha de dois tubos e alma..... | 24 |
| Figura 14 - Microestrutura para uma borracha vulcanizada com enchimento de negro de carbono. Círculos cinza: partículas de carbono. Linhas sólidas: cadeias de polímeros. Ziguezague e linhas tracejadas: ligações cruzadas..... | 25 |

| | |
|---|----|
| Figura 15 (a) - Carga em função do tempo, onde a carga é aplicada instantaneamente no tempo t_a e aliviada no tempo t_r . Para o ciclo carga-tempo em (a), as respostas de deformação versus tempo são para comportamentos totalmente elásticos (b), viscoelásticos (c) e viscosos (d)..... | 27 |
| Figura 16 - Laço de histerese típico de cisalhamento harmônico, em (a) comportamento linear e (b) comportamento não-linear..... | 29 |
| Figura 17 - Dependência do módulo dinâmico (a) e amortecimento (b) da frequência para uma borracha com carga reforçante de negro de fumo..... | 31 |
| Figura 18 - Dependência do módulo dinâmico (a) e ângulo de fase (b) da frequência para uma borracha natural com carga reforçante de negro de fumo. A influência da temperatura é também mostrada..... | 31 |
| Figura 19 - A dependência do módulo dinâmico (a) e do ângulo de fase (b) da temperatura para uma borracha natural com carga reforçante de negro de fumo. A influência da frequência é também mostrada..... | 32 |
| Figura 20 - Dependência do módulo dinâmico (a) e amortecimento (b) da amplitude de deformação para uma borracha natural com carga..... | 33 |
| Figura 21 - Separação dos efeitos da frequência e amplitude. Módulo dinâmico (a) e do ângulo de fase (b) em função da amplitude de deformação para frequências diferentes. Borracha natural, com dureza 60 Shore A..... | 34 |
| Figura 22 - Relação força em função do deslocamento para uma borracha vulcanizada exposta a ciclos de carga e descarga. O Efeito Mullins pode ser claramente observado..... | 35 |
| Figura 23 - Efeito da área superficial e da estrutura do negro-de-fumo no módulo elástico em um composto de borracha carregado com 50 phr de diferentes tipos de carga..... | 37 |
| Figura 24 - Efeitos da densidade de reticulação sobre as propriedades dos elastômeros Vulcanizados..... | 39 |
| Figura 25 - Bucha de borracha..... | 42 |
| Figura 26 - Máquina servo-hidráulica INSTRON 8874..... | 44 |
| Figura 27 - Sistema de coordenadas utilizado neste trabalho..... | 45 |
| Figura 28 - Diagrama esquemático definindo os quatro modos de deformação padrão..... | 46 |

| | |
|---|----|
| Figura 29 – Condicionamento mecânico, em (a) para o modo de deformação axial e em (b) para o modo de deformação torcional..... | 46 |
| Figura 30 - Rampa para realização dos ensaios estáticos para o modo de deformação axial..... | 48 |
| Figura 31 - Rampa para realização dos ensaios estáticos para o modo de deformação torcional..... | 49 |
| Figura 32 - Rampa para realização dos ensaios estáticos para o modo de deformação radial..... | 50 |
| Figura 33 - Rampa de deslocamento utilizada para realização dos ensaios estáticos axial-torcional acoplado..... | 51 |
| Figura 34 - Rampa de solicitações utilizada para realização dos ensaios dinâmicos axial-torcional acoplado..... | 54 |
| Figura 35 – Resposta em força em função do deslocamento axial para uma bucha de borracha solicitada até a ruptura..... | 56 |
| Figura 36 – Condicionamento mecânico para o modo de deformação axial..... | 57 |
| Figura 37 – Em (a) forças axiais em função do deslocamento de 1,00 mm para os tempos de subida e em (b) forças axiais em função do deslocamento de 2,00 mm para os tempos de subida..... | 58 |
| Figura 38 – Em (a) forças axiais em função do deslocamento de 5,00 mm para os tempos de subida e em (b) forças axiais em função do deslocamento de 6,00 mm para os tempos de subida..... | 60 |
| Figura 39 – Em (a) forças axiais em função do deslocamento de 9,00 mm para os tempos de subida e em (b) forças axiais em função do deslocamento de 10,00 mm para os tempos de subida..... | 61 |
| Figura 40 – Forças axiais em função dos deslocamentos após o relaxamento..... | 62 |
| Figura 41 – Resposta do torque em função da rotação para a bucha de borracha solicitada até a ruptura..... | 63 |
| Figura 42 – Condicionamento mecânico para o modo de deformação torcional..... | 64 |
| Figura 43 – Em (a) torque em função da rotação de 1 grau para os tempos de giro e em (b) torque em função da rotação de 5 graus para os tempos de giro | 65 |

| | |
|--|----|
| Figura 44 – Em (a) torque em função da rotação de 10 grau para os tempos de giro e em (b) torque em função da rotação de 15 graus para os tempos de giro..... | 66 |
| Figura 45 – Em (a) torque em função da rotação de 20 grau para os tempos de giro e em (b) torque em função da rotação de 30 graus para os tempos de giro..... | 67 |
| Figura 46 – Torques em função das rotações após o relaxamento..... | 68 |
| Figura 47 – Resposta em força em função do deslocamento radial para uma bucha de borracha solicitada até 3,00 mm..... | 69 |
| Figura 48 – Condicionamento mecânico para o modo de deformação radial..... | 70 |
| Figura 49 – Em (a) forças radiais em função do deslocamento de 0,25 mm para os tempos de subida e em (b) forças radiais em função do deslocamento de 0,5 mm para os tempos de subida..... | 71 |
| Figura 50 – Em (a) forças radiais em função do deslocamento de 1,00 mm para os tempos de subida..... | 72 |
| Figura 51 – Em (a) forças radiais em função do deslocamento de 1,50 mm para os tempos de subida e em (b) forças radiais em função do deslocamento de 2,00 mm para os tempos de subida..... | 73 |
| Figura 52 – Forças radiais em função dos deslocamentos após o relaxamento..... | 74 |
| Figura 53 – Em (a) torque para o ângulo de 5° versus deslocamento axial e em (b) torque para o ângulo de 10° versus deslocamento axial..... | 75 |
| Figura 54 – Em (a) torque para o ângulo de 15° versus deslocamento axial e (b). torque para o ângulo de 20° versus deslocamento axial..... | 76 |
| Figura 55 – Em (a) torque para o ângulo de 25° versus deslocamento axial e em (b) torque para o ângulo de 30° versus deslocamento axial..... | 77 |
| Figura 56 - Variação percentual no torque em função do deslocamento axial..... | 79 |
| Figura 57 - Variação percentual do relaxamento torcional em função do deslocamento axial..... | 80 |
| Figura 58 - Força axial para os ângulos em função do deslocamento axial..... | 81 |

| | |
|---|----|
| Figura 59 – Em (a) forças axiais em função dos deslocamentos de 0.50 mm, 1,00 mm, 1.50 mm e 2,00 mm para a frequência de 5 Hz e em (b) forças axiais em função do deslocamento de 0.50 mm, 1,00 mm, 1.50 mm e 2,00 mm para a frequência de 20 Hz..... | 83 |
| Figura 60 – Em (a) forças axiais em função dos deslocamentos de 0.50 mm para as frequências de 5 Hz, 10 Hz, 15 Hz e 20 Hz e em (b) forças axiais em função do deslocamento de 2,00 mm para as frequências de 5 Hz, 10 Hz, 15 Hz e 20 Hz..... | 84 |
| Figura 61 – Em (a) forças axiais em função dos deslocamentos de 2.50 mm, 5,00 mm, 7.50 mm e 10,00 mm para a frequência de 1 Hz e em (b) forças axiais em função do deslocamento de 2.50 mm, 5,00 mm, 7.50 mm e 10,00 mm para a frequência de 4 Hz..... | 86 |
| Figura 62 – Em (a) forças axiais em função dos deslocamentos de 2.50 mm para as frequências de 1 Hz, 2 Hz, 3 Hz e 4 Hz e em (b) forças axiais em função do deslocamento de 10,00 mm para as frequências de 1 Hz, 2 Hz, 3 Hz e 4 Hz... | 87 |
| Figura 63 – Em (a) torque em função da rotação de 5 graus, 6 graus, 7 graus, e 8 graus para a frequência de 5 Hz e em (b) torque em função da rotação de 5 graus, 6 graus, 7 graus, e 8 graus para a frequência de 8 Hz..... | 89 |
| Figura 64 – Em (a) torque em função da rotação de 5 graus para as frequências de 5 Hz, 6 Hz, 7 Hz, e 8 Hz e em (b) torque em função da rotação de 8 graus para a frequência de 5 Hz, 6 Hz, 7 Hz, e 8 Hz..... | 90 |
| Figura 65 – Em (a) torque em função da rotação de 5 graus, 10 graus, 20 graus e 30 graus para a frequência de 1 Hz e em (b) torque em função da rotação de 5 graus, 10 graus, 20 graus e 30 graus para a frequência de 4 Hz..... | 92 |
| Figura 66 – Em (a) torque em função da rotação de 5 graus para as frequências de 1 Hz, 2 Hz, 3 Hz e 4 Hz e em (b) torque em função da rotação de 30 graus para a frequência de 1 Hz, 2 Hz, 3 Hz e 4 Hz..... | 94 |
| Figura 67 – Em (a) forças radiais em função dos deslocamentos de 0.05 mm, 0.10 mm, 0.15 mm e 0.20 mm para a frequência de 5 Hz e em (b) forças radiais em função do deslocamento de 0.05 mm, 0.10 mm, 0.15 mm e 0.20 mm para a frequência de 20 Hz..... | 95 |

| | |
|--|-----|
| Figura 68 – Em (a) forças radiais em função dos deslocamentos de 0.05 mm para as frequências de 5 Hz, 10 Hz, 15 Hz e 20 Hz e em (b) forças radiais em função do deslocamento de 0.20 mm para as frequências de 5 Hz, 10 Hz, 15 Hz e 20 Hz..... | 96 |
| Figura 69 – Em (a) forças radiais em função dos deslocamentos de 0.25 mm, 0.50 mm, 0.75 mm e 1,00 mm para a frequência de 1 Hz e em (b) forças radiais em função do deslocamento de 0.25 mm, 0.50 mm, 0.75 mm e 1,00 mm para a frequência de 4 Hz..... | 98 |
| Figura 70 – Em (a) forças radiais em função dos deslocamentos de 0.25 mm para as frequências de 1 Hz, 2 Hz, 3 Hz e 4 Hz e em (b) forças radiais em função do deslocamento de 2,00 mm para as frequências de 1 Hz, 2 Hz, 3 Hz e 4 Hz..... | 99 |
| Figura 71 - Torque em função do ângulo de 5° para os deslocamentos axiais..... | 101 |
| Figura 72 - Torque em função do ângulo de 10° para os deslocamentos axiais..... | 102 |
| Figura 73 - Torque em função do ângulo de 20° para os deslocamentos axiais..... | 103 |
| Figura 74 - Torque em função do ângulo de 30° para os deslocamentos axiais..... | 104 |
| Figura 75 - Variação percentual do torque em função dos deslocamentos axiais de 0,00 a 10,00 mm para as rotações..... | 105 |

Lista de Tabelas

| | |
|--|----|
| Tabela 1 - Substâncias contidas na borracha natural seca..... | 14 |
| Tabela 2 - Variação do módulo elástico em função do teor de enxofre em um composto a base de borracha natural..... | 40 |
| Tabela 3 - Dimensões da bucha de borracha..... | 43 |
| Tabela 4 - Especificações da máquina utilizada para realização dos ensaios..... | 44 |
| Tabela 5 - Deslocamentos e tempos de subida dos ensaios estáticos para o modo de deformação axial..... | 48 |
| Tabela 6 - Deslocamentos e tempos de giro dos ensaios estáticos para o modo de deformação torcional..... | 49 |
| Tabela 7 - Deslocamentos e tempos de subida dos ensaios estáticos para o modo de deformação radial..... | 50 |
| Tabela 8 – Deslocamentos e frequências para os ensaios dinâmicos para o modo de deformação axial..... | 52 |
| Tabela 9 – Rotações e frequências para os ensaios dinâmicos para o modo de deformação torcional..... | 52 |
| Tabela 10 – Deslocamentos e frequências para os ensaios dinâmicos para o modo de deformação radial..... | 53 |
| Tabela 11 – Forças axiais para os deslocamentos de 0,50 mm e 2,00 mm para as frequências de 5 Hz, 10 Hz, 15 Hz e 20 Hz..... | 85 |
| Tabela 12 – Forças axiais para os deslocamentos de 2,50 mm e 10,00 mm para as frequências de 1 Hz, 2 Hz, 3 Hz e 4 Hz..... | 88 |
| Tabela 13 – Torques para os ângulos de 5 graus e 8 graus para as frequências de 5 Hz, 6 Hz, 7 Hz e 8 Hz..... | 91 |
| Tabela 14 – Torques para os ângulos de 5 graus e 30 graus para as frequências de 1 Hz, 2 Hz, 3 Hz e 4 Hz..... | 93 |
| Tabela 15 – Forças radiais para os deslocamentos de 0,05 mm e 0,20 mm para as frequências de 5 Hz, 10 Hz, 15 Hz e 20 Hz..... | 97 |
| Tabela 16 – Forças radiais para os deslocamentos de 0,25 mm e 2,00 mm para as frequências de 1 Hz, 2 Hz, 3 Hz e 4 Hz..... | 99 |

Capítulo 1

INTRODUÇÃO

1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Os materiais poliméricos passaram a ocupar um lugar de destaque dentre os materiais utilizados na indústria automotiva, devido a razões econômicas e tecnológicas. Nos últimos trinta anos, utiliza-se uma maior diversidade de materiais poliméricos do que metais na fabricação de um veículo, devido ao grande número de artefatos possíveis de serem manufaturados com materiais poliméricos e utilizados no setor automotivo (Hemais, 2003). Em algumas aplicações da indústria automotiva, os polímeros são fundamentais em virtude de suas características e propriedades específicas, sendo em alguns casos, um material insubstituível.

Os elastômeros são exemplos destes materiais ditos insubstituíveis. Em determinadas aplicações, a característica intrínseca de uma borracha, capaz de suportar grandes deformações reversíveis sobre tensão aplicada, torna um tanto particular sua utilização na indústria automotiva.

Segundo a Norma ISO 1382 (2008) – “*Rubber Vocabulary*”, define-se:

Polímero - Substância composta por moléculas caracterizadas pela repetição múltipla de uma ou de várias espécies de átomos ou de grupos de átomos, ligados entre si em quantidade suficiente para conferir um conjunto de propriedades que não variam de uma forma marcada por adição ou remoção de uma ou de algumas unidades constitutivas;

Elastômero - Material macromolecular que recupera rapidamente a sua forma e dimensões aproximadas iniciais, após uma deformação substancial causada por uma tensão e subsequente retirada da mesma.

Borracha – a borracha pode ter 3 definições diferentes dependendo do contexto. Pode ser como produto final, matéria prima ou material intermediário para fabricação de um produto.

- **Produto final:** borracha é uma família de materiais poliméricos que são flexíveis e elásticos.

- **Matéria prima:** borracha é um polímero elástico natural ou sintético (elastômero) que forma a base do composto usado em muitos produtos de borracha.

- **Material intermediário para fabricação de um produto:** borracha é sinônimo de composto. Composto é o termo preferencial a ser utilizado no caso de material intermediário.

Algumas aplicações típicas para as borrachas incluem pneus, coxins de motor, dutos de ar, mangueiras, componentes de sistemas de vedação e buchas de borracha utilizadas em sistemas de suspensão e que são o objeto de estudo desta dissertação.

Buchas de borracha podem ser encontradas em todos os sistemas de suspensão de veículos. Os componentes da suspensão são conectados uns aos outros, para a subestrutura, e para a estrutura da carroceria através de buchas de borracha. As características mecânicas de uma bucha de borracha são de natureza muito complexa, devido ao fato de que a resposta aos estímulos mecânicos é dependente de inúmeras variáveis, tais como a taxa de deformação, amplitude, pré-carga, temperatura, entre outras. Em geral, a dependência da amplitude de deslocamento é predominante, mas para algumas aplicações as outras variáveis também podem ser críticas para o comportamento mecânico (Karlsson e Persson, 2003).

As buchas de borracha são componentes críticos nos sistemas de suspensão dos veículos, e são instaladas nestes sistemas para isolar vibração, reduzir a transmissão de ruído, movimentos oscilatórios e acomodar e aceitar o desalinhamento de eixos. As buchas utilizadas neste estudo são compostas de um cilindro oco de borracha, contido entre uma luva de aço cilíndrica externa e uma luva de aço cilíndrica interna, conforme Figura 1. As luvas da bucha de borracha conectam o sistema de suspensão automotiva ao chassi, e são usadas para transferência de forças e momentos da roda através do material elastomérico para o chassi.

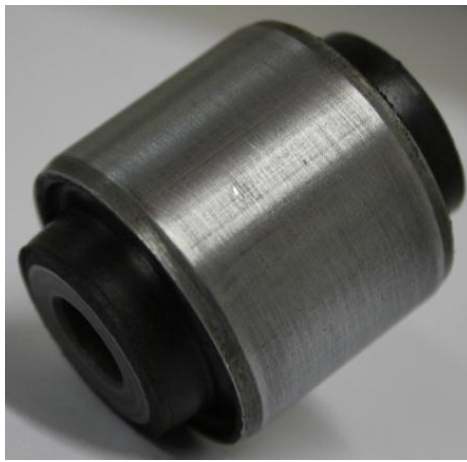


Figura 1 - Bucha de borracha.

Segundo Busfield et al (2001) durante o uso normal, as luvas interna e externa da bucha de borracha sofrem deslocamentos e rotações uma em relação à outra sobre seus eixos, tanto ao longo e perpendicular à linha de centro das luvas, dando origem a quatro modos diferentes de deformação, os quais são definidos como de torção, axial, radial, e cônico. É este movimento relativo que enfatiza o uso do material elastomérico e permite a transmissão de forças e momentos através da bucha. Os quatro modos de deformação são mostrados na Figura 2 e segundo Adkins et al (1954) podem ser descritos da seguinte forma:

- O modo de deformação axial é definido como o deslocamento de uma luva em relação à outra em paralelo a sua linha central, e pode ser produzido pela fixação da luva externa, enquanto a luva interna sofre um deslocamento em que cada ponto move-se paralelamente ao eixo central.

- O modo de deformação torcional é definido como a rotação de uma luva em relação à outra em torno do seu eixo central, e pode ser produzido pela fixação da luva externa, enquanto a luva interna sofre uma rotação sobre seu eixo.
- O modo de deformação radial é definido como o deslocamento de uma luva em relação à outra em que cada ponto se move a uma distância igual e perpendicular à linha central, e pode ser produzido pela fixação da luva externa, enquanto a luva interna sofre um deslocamento em que cada ponto se move através de distâncias igualmente espaçadas, perpendicular a um plano contendo o eixo central.
- O modo de deformação cônica é definido como uma rotação de uma luva em relação à outra num plano radial, sobre um ponto a meia distância de suas extremidades, e pode ser produzido pela fixação da luva externa, enquanto a luva interna sofre uma rotação num plano radial a meia distância de sua extremidade.

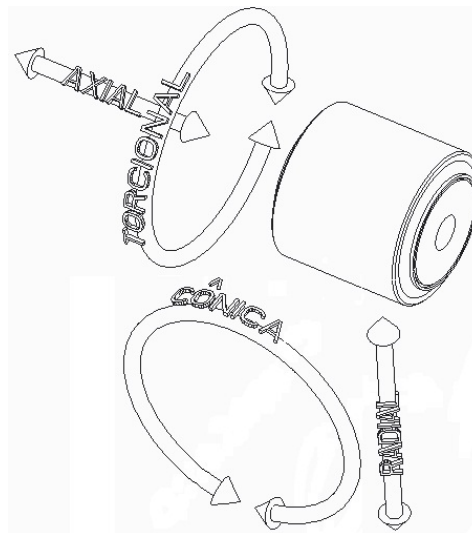


Figura 2 – Quatro modos de deformações padrão.

Algumas publicações são encontradas na literatura para descrever e modelar o comportamento mecânico de buchas de borracha. Wineman et al (1998) apresentam um modelo matemático para a relação força em função do deslocamento não linear de buchas de borracha, onde as características viscoelásticas são incluídas. Resultados deste modelo matemático são apresentados para o modo de deformação radial. Relata o autor que ao comparar os resultados do modelo matemático com dados obtidos experimentalmente uma boa concordância foi obtida.

Lee et al (1999-a) apresentam para o modo de deformação axial, a formulação de um modelo matemático para o estudo da relação força/deslocamento de buchas de borracha. Continuando seus estudos, Lee et al (1999-b) desenvolvem um trabalho similar para o modo de deformação torcional. Nestes trabalhos o comportamento não linear e viscoelástico de buchas de borracha foi estudado através de simulações numéricas, uma função de relaxamento da força é apresentada, a qual é validada com ensaios experimentais, mostrando uma boa concordância. Mais adiante, Lee et al (2000) estudam o modo de deformação axial-torcional acoplado, neste trabalho os autores buscam ampliar os estudos já realizados sobre as características não lineares e viscoelásticas de buchas de borracha para o modo de deformação axial-torcional acoplado. Em outro trabalho, Lee et al (2003) apresentam resultados de estudos experimentais para o modo de deformação axial de uma bucha de borracha disponível comercialmente, as características não lineares e viscoelásticas são estudadas experimentalmente e utilizadas para comparação com modelos matemáticos propostos.

Tárrago et al (2007-a) elaboraram um trabalho para estudar o modo de deformação axial de buchas de borracha e posteriormente avaliaram em um trabalho similar Tárrago et al (2007-b), o modo de deformação torcional para o mesmo tipo de bucha. Ambos os trabalhos apresentam um estudo teórico e experimental para determinação de rigidez de buchas de borracha considerando a dependência da frequência e da amplitude de deformação.

Kadlowec et al (2003) apresentam um estudo teórico experimental do comportamento mecânico de buchas de borracha para o modo de deformação radial-torcional acoplado, neste trabalho resultados de estudos experimentais são comparados com resultados de simulação por elementos finitos, verificou-se que a análise de elementos finitos apresentou bons resultados apenas para pequenas deformações radiais, não se obteve bons resultados para o modo de deformação radial-torcional acoplado. Mais adiante Kadlowec et al (2009), apresentam estudos experimentais e computacionais de buchas de borracha submetidas à deformação axial, torcional e acoplados modos de deformação axial-torcional. Os autores relatam que não foi encontrado boa concordância nos resultados para os estudos computacionais para o modo de deformação acoplado quando comparados com resultados experimentais.

Ok et al (2007-a) apresentam um estudo teórico experimental para o modo de deformação radial, torcional e radial-torcional acoplado. Neste trabalho um modelo matemático foi proposto e apresentou bons resultados quando comparado com resultados de ensaios experimentais. Posteriormente Ok et al (2007-b) estudam experimentalmente o modo de deformação axial, radial, axial-radial acoplado, radial-normal acoplado e axial-radial-normal acoplado para buchas de borracha. Neste trabalho vários resultados experimentais interessantes são apresentados e estão disponíveis para utilização na comparação com simulações numéricas.

1.2 MOTIVAÇÃO E JUSTIFICATIVAS PARA O TRABALHO

A associação entre elevadas deformações elásticas, baixo módulo de elasticidade, comportamento viscoelástico, complexidade, devido ao fato de que a resposta de uma bucha de borracha sob uma solicitação mecânica é dependente de várias variáveis, tais como frequência, amplitude, pré-carga, temperatura, entre outras, e os diferentes modos de deformação possíveis para uma bucha de borracha, motivou o interesse para realização deste trabalho.

O presente trabalho é justificado por algumas razões, dentre as quais podemos citar como principais:

- Poucas referências, na literatura, sobre o comportamento mecânico de buchas de borracha.
- Carência de informações sobre o comportamento de buchas de borracha sobre taxas de deformação e amplitudes de deformação diferentes.
- Carência de informações reportadas na literatura que possibilitem avaliar os efeitos de solicitações acopladas na resposta de buchas de borracha em condições estáticas e dinâmicas.

1.3 OBJETIVOS

O presente trabalho tem como objetivo principal prover à indústria automobilística uma caracterização relevante das propriedades mecânicas de uma bucha de borracha utilizada em suspensões automotivas, quando submetida a solicitações estáticas e dinâmicas em simples e acoplados modos de deformações.

Além disso, o trabalho tem como objetivo apresentar resultados de estudos experimentais realizados em laboratório em uma bucha de borracha comercialmente disponível, submetida a solicitações estáticas e dinâmicas, para os modos de deformação radial, axial, torcional e modos combinados axial-torcional, mostrando o quanto a resposta da bucha de borracha a estas solicitações é dependente da taxa de aplicação da deformação e amplitudes de deformação diferentes.

Pretende-se também com o desenvolvimento deste trabalho contribuir com outros dados relevantes relacionados às especificações e aplicações de buchas elastoméricas.

1.4 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Além da apresentação das considerações iniciais, motivação, justificativas e objetivos a ser alcançados, este trabalho é estruturado de forma a demonstrar o estado da arte em relação ao tema proposto por meio de uma revisão da literatura, apresentar a metodologia experimental adotada para a obtenção de dados experimentais, discutir e analisar os resultados e apresentar as conclusões pertinentes ao trabalho e as possibilidades de aprimoramento da pesquisa no futuro.

A revisão da literatura descreve o estado da arte envolvendo pesquisas sobre o comportamento mecânico de buchas de borracha sobre solicitações estáticas e dinâmicas para os modos de deformação simples e acoplado. Também apresenta uma síntese histórica sobre a borracha natural, aborda a coleta e processamento do látex e o processo de fabricação de compostos a base de borracha natural. O processo de fabricação de buchas de borracha e

alguns tipos básicos de buchas de borracha são apresentados. Algumas propriedades dos compostos a base de borracha natural são apresentadas.

A metodologia experimental apresenta informações sobre a bucha de borracha utilizada, as instalações experimentais, os modos de deformações possíveis, a preparação das buchas para realização dos ensaios, bem como toda a metodologia empregada para investigar a influência da taxa de aplicação da deformação, amplitude de deformação e solicitações acopladas no comportamento de buchas de borracha.

Em resultados e discussões são apresentados e discutidos os resultados dos ensaios estáticos e dinâmicos para os modos de deformação axial, torcional, radial e axial-torcional acoplado.

Por fim, são apresentadas as conclusões gerais e as sugestões para desenvolvimento de próximos trabalhos.

Capítulo 2

REVISÃO DA LITERATURA

2.1 SÍNTESE HISTÓRICA DA BORRACHA NATURAL

A borracha virgem foi conhecida pelos europeus durante a segunda viagem de Cristóvão Colombo às Américas, àquela época (1493-1496), ainda conhecida como “Índias Ocidentais”. A borracha – uma “resina elástica” – era obtida a partir de um líquido branco, com aspecto leitoso (a que mais tarde foi dado o nome de “látex”), substância que era extraída de uma árvore natural das Américas (*Hevea Brasiliensis*), e que solidificava gradualmente por exposição ao ar, tornando-se numa massa de cor escura. Os indígenas utilizavam este material num tipo de jogo, sob a forma de bolas. Cristóvão Colombo e os seus companheiros verificaram ainda que este material era utilizado pelos indígenas na impermeabilização de calçados e de peças de vestuário (Ciecielski, 1999; Mano e Mendes, 1999; Pecorari, 2007).

Este extrato, produto da coagulação e secagem do látex, foi levado para a Europa onde recebeu o nome de borracha em 1770 quando John Priestly descobriu que este poderia apagar as marcas de lápis. No começo do século XIX, a borracha foi reconhecida como um material flexível, forte (difícil de quebrar), e a prova de água. No entanto sua exploração comercial foi restrita devido ao seu difícil processamento. Mais importante que isso, artigos feitos de borracha tornavam-se rígidos e duros em climas frios e moles e pegajosos em climas quentes. A longa procura por fazer artefatos de borracha que fossem úteis, levou Thomas Hancock da Grã Bretanha a inventar em 1820, uma máquina para processar borracha. O “mastigador”

inventado por ele sujeitava a borracha a intenso cisalhamento que fazia com que a borracha ficasse macia o suficiente para ser misturada e conformada. Esse desenvolvimento foi seguido, em 1839, pela descoberta da vulcanização, que é creditada a dois pesquisadores: Hancock e Charles Goodyear dos Estados Unidos. (Canevarolo Jr, 2002; Ciecieski, 1999; Garbim, 2011).

A fonte do látex naquela época foi a árvore *Hevea Brasiliensis*, que é nativa do vale Amazônico. O Brasil se tornou o principal fornecedor de borracha, mas com o crescimento do uso de borracha, algumas questões surgiram quanto à capacidade do país de assegurar o fornecimento a partir dessas árvores selvagens. Em 1876, Henry Wickham coletou 70.000 sementes de *Hevea Brasiliensis* no Brasil e enviou a Kew Gardens em Londres para germinação. Poucas sementes germinaram, mas as que conseguiram firmar-se permitiram aos Ingleses estabelecer um sistema de plantação em todo o Leste do país. (Ciecieski, 1999; Ciullo, 1999; Pecorari, 2007).

A patente de Dunlop para pneumáticos na Inglaterra em 1888 surgiu na era das bicicletas como um precursor para a era dos automóveis. Pneus necessitam de borracha e a demanda cresceu tanto no início do século XX que todas as fontes de borracha natural na América e África chegaram a seu limite. Essa demanda e os altos preços causados por ela fizeram a plantação migrar para outras áreas, tais como: Ceilão (Sri Lanka), Malaia (Malásia), Cingapura e o Leste Indiano (Indonésia). Em 1914, a extração de borracha natural de árvores plantadas já havia superado a exploração de árvores naturais e em 1920 essas plantações já representavam 90% das explorações para fornecimento de borracha natural. (Ciecieski, 1999; Ciullo, 1999; Mano e Mendes, 1999; Pecorari, 2007).

A disponibilidade de plantações de alta qualidade de borracha natural facilitou os avanços nos métodos de produção e a melhoria na qualidade dos produtos. A demanda de borracha também gerou o início nas pesquisas de substitutos para este material. No começo de 1880 os químicos orgânicos identificaram isopreno como a principal estrutura unitária da borracha. Em 1890, muitos pesquisadores fizeram a síntese de poli-isopreno. Porém, com a disponibilidade de borracha natural, alternativas sintéticas permaneceram principalmente no interesse acadêmico. Durante a primeira Guerra Mundial, foi produzida grande quantidade de borracha sintética, porém a produção foi abandonada depois da guerra devido às propriedades inferiores desse material (Ciullo, 1999).

Após a primeira Guerra Mundial, os governos da Alemanha e Rússia, países militares mais susceptíveis a perdas de fornecimento de borracha natural, iniciaram programas de desenvolvimento de alternativas sintéticas. Essa iniciativa ganhou força na década de 1920 quando os preços da borracha subiram novamente devido a restrições na produção da Inglaterra (Ciullo, 1999; Garbim, 2011).

Quando a segunda Guerra Mundial iniciou em 1939, tanto a Alemanha quanto a Rússia podiam suprir satisfatoriamente suas necessidade de borracha com alternativas sintéticas. Quando a guerra se espalhou por todo o Leste Europeu, o governo dos Estados Unidos chegou à conclusão que o fornecimento de borracha natural estava em risco. Em 1940, o governo dos EUA estabeleceu uma organização governamental chamada “Rubber Reserve Company”. Essa organização tinha a responsabilidade de manter reservas de borracha natural em estado de pronta entrega e iniciar pesquisas de borracha sintética e um programa de desenvolvimento desse material. Baseado na tecnologia desenvolvida na Alemanha e Rússia antes da guerra, polímeros de estireno-butadieno tornaram-se foco no desenvolvimento como a principal alternativa para a borracha natural (Ciulo, 1999).

A segunda Guerra Mundial representou a adolescência acelerada da indústria da borracha, a preparação para sua maturação no pós-guerra e crescimento. O desenvolvimento na química orgânica e polimérica gerou o entendimento das propriedades da borracha natural. Verificou-se que a borracha natural é um material estratégico, pois não é substituída por borrachas sintéticas em muitas aplicações. Isto se deve a dois fatores: a) suas propriedades especiais: resiliência, elasticidade, flexibilidade, resistência à abrasão, ao impacto e à corrosão, fácil adesão a tecidos e aço e impermeabilidade, propriedades isolantes de eletricidade, impermeabilidade a líquidos, capacidade de dispersar calor e maleabilidade a baixas temperaturas; b) relação de preço versus desempenho das borrachas sintéticas que se equiparem à borracha natural (Ciulo, 1999; Van Beilen, 2007).

A borracha natural é um polímero de poli (cis-1,4-isopreno), conforme estrutura química mostrada na Figura 3, e apresenta propriedades únicas devido a sua estrutura intrínseca, alta massa molar e presença de outros componentes minoritários como proteínas, carboidratos, lipídios e minerais presentes no látex. (Van Beilen, 2007).

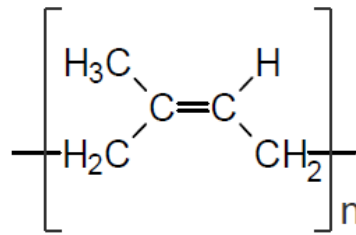


Figura 3 – Estrutura química da borracha natural.

Um exemplo prático da importância da borracha natural está na fabricação de pneus para caminhões, ônibus e aviões, que não podem ser feitos com borracha sintética devido à drástica diminuição de suas propriedades (Rippel, 2009).

2.2 COLETA E PROCESSAMENTO DO LÁTEX

Segundo Garbim (2011) o látex é extraído por meio de cortes inclinados normalmente chamados de sangria, feitos na casca do tronco das árvores *Hevea Brasiliensis*, e colhido em pequenas canecas afixadas na extremidade inferior do corte. Na Figura 4 pode-se observar o corte feito nas árvores para a extração do látex.



Figura 4 - Extração do látex.

Depois de 3 a 4 horas da sangria, o látex é retirado das canecas e acondicionado em tanques, onde juntamente com o látex é adicionado “amônia,” numa proporção de 0,05%, como estabilizador, ou seja, para evitar a coagulação precoce, (algumas vezes pode ser usado o sulfeto de sódio ou formaldeído como estabilizador).

Após a coleta do látex, as árvores continuam a escoar látex em quantidades bem menores, por várias horas, este látex acaba por coagular-se espontaneamente sobre o corte na casca. Na data da próxima sangria, o seringueiro retira a película de látex coagulado e em seguida efetua nova incisão (sangria). As películas retiradas das diversas árvores (látex coagulado espontaneamente) são transportadas para usina de beneficiamento e misturadas às borrachas em processamento. A quantidade de borracha obtida por látex coagulado espontaneamente nas árvores constitui entre 15 a 20% do total de produção da usina.

Quando o látex (líquido) chega à usina de beneficiamento, este recebe agentes coagulantes, como ácido fórmico ou ácido acético. Em seguida, todo material (látex + coagulantes misturados) é acondicionado em grandes tanques chamados de tanques de coagulação. Após algum tempo (de 1 a 18 horas) de estocagem nos tanques de coagulação o látex agora coagulado passa por processos de separação da água resultante, este processo pode ser por decantação, centrifugação, rolos secadores etc., com o objetivo de obter a borracha o mais seca possível. Aproximadamente 60% de todo látex colhido na plantação torna-se borracha seca.

Muitas vezes, as indústrias produzem artefatos a partir do látex (em forma líquida), porém não abordaremos aqui este tópico, porque faz parte do assunto específico de processamento industrial de borracha líquida.

Dependendo da forma de separação sólido / líquido da borracha, podem-se obter lâminas de borracha seca ou blocos agregados.

As lâminas passam, em seguida, por moinhos crepadores para aumentar à área superficial facilitando assim a pós-secagem do material, que pode ser em câmaras sob condições e temperatura ambiente ou pós-secagem em estufas por ar quente. Em seguida as lâminas crepadas e secas são prensadas, formando fardos, embaladas com filme plástico, identificando-se os fardos para posterior comercialização. No Brasil os fardos são de 25 kg.

Os blocos de coágulos são triturados em moinhos especiais, lavados, secados em estufa por ar quente, prensados em forma de fardo, embalados com filme plástico, identificados e comercializados.

Tanto as lâminas quanto os fardos embalados, enquanto aguardam a comercialização, são acondicionados em armazéns escuros, protegidos da luz, umidade, ozônio, fungos, etc. A Tabela 1 apresenta as substâncias contidas na borracha natural seca.

Tabela 1 - Substâncias contidas na borracha natural seca (Garbim, 2011).

| Substância | Quantidade |
|-------------------------------|-------------------|
| Hidrocarbonetos de Borracha | ~ 93,7% |
| Proteínas | ~ 2,2% |
| Carboidratos | ~ 0,4% |
| Lipídios Naturais | ~ 2,4% |
| Glicolipídios + Fosfolipídios | ~ 1,0% |
| Materiais Inorgânicos | ~ 0,2% |
| Outros | ~ 0,1% |

2.3 PREPARAÇÃO DOS COMPOSTOS

Os artefatos de borracha natural são feitos a partir de uma composição (composto) que tem como componente principal o polímero natural (borracha seca). Nessa composição são incorporados ao polímero (que é o aglutinante) determinados produtos em quantidades variáveis, conforme as características finais exigidas. Assim é necessário proceder à escolha e a quantificação desses ingredientes, o que permite a diversificação de emprego do composto para finalidades diferentes (Mano e Mendes, 1999).

A elaboração da formulação de um composto de borracha, principalmente para artigos técnicos, deve ser minuciosa, pois todos os ingredientes devem ser escolhidos com extremo critério de forma que o composto misturado atenda as características necessárias, e que cada componente seja perfeitamente compatível com os demais na formulação (Garbim, 2011).

Outro fator importantíssimo é a manipulação dos ingredientes, pois, variações nas quantidades podem comprometer de forma irremediável o composto. A ordem de mistura e incorporação dos ingredientes deve ser cuidadosamente orientada. Devem ser observados os

detalhes de cada tipo de composto, para se obter uma homogeneização perfeita sem perder as propriedades, além das características típicas dos processos de conformação subsequentes (Garbim, 2011).

Segundo Mano e Mendes (1999) uma composição moldável de borracha é complexa. A massa é comumente designada composição vulcanizável e sempre contem além do elastômero, alguns aditivos, em pequena quantidade, pode ainda conter outros ingredientes, sob a forma de carga e plastificante. Quando a composição vulcanizável não contém carga é chamada de goma pura. Os principais ingredientes são os seguintes:

- Polímero básico (elastômero)
- Agentes de vulcanização;
- Aceleradores;
- Ativadores;
- Antioxidante;
- Cargas (reforçadora ou inerte);
- Plastificantes, etc.

Após a dosagem precisa, obedecendo à formulação, a borracha seca e os ingredientes devem ser misturados em equipamentos específicos chamados de misturadores, onde é feita a homogeneização da massa, à temperatura conveniente. As composições elastoméricas são preparadas em misturadores abertos, de cilindros ou em misturadores fechados, do tipo Bambury. A massa homogeneizada, denominada tecnicamente massa crua, é submetida, por exemplo, à moldagem, sob calor e pressão. Nesse estágio ocorre a reação de vulcanização, passando o polímero do estado termoplástico ao estado termorrígido, ou vulcanizado (Mano e Mendes, 1999).

2.4 VULCANIZAÇÃO

Um pedaço de borracha não vulcanizado é uma massa de polímero de longas cadeias, todas emaranhadas, como uma bacia de espaguete. Quando é esticado, ocorrem duas coisas: desemaranhamento das cadeias até certo ponto, e há um grau de deslizamento, as cadeias se

escorregam e deslizam umas sobre as outras, e também tendem a se endireitar, tanto mais facilmente quanto mais elevada for a temperatura, a cadeias moleculares da borracha assim permaneceram mesmo que cesse a força que provocou a deformação. (Caetano, 2012; Ciecieski, 1999), conforme ilustrado na Figura 5.

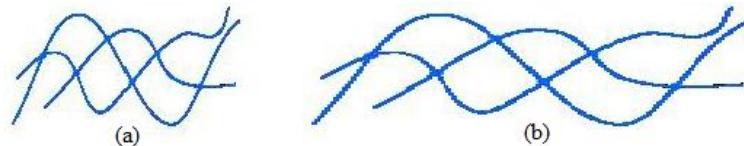


Figura 5 - Cadeias Moleculares de uma borracha não vulcanizada, em (a) antes da aplicação de uma deformação e em (b) após a aplicação de uma deformação (Adaptado de Caetano, 2012).

Se a borracha tiver sido vulcanizada, as cadeias moleculares não possuem o mesmo grau de liberdade, pois as ligações estabelecidas pelos átomos de enxofre restringem esses movimentos. O emaranhado de cadeias moleculares pode deformar-se, mas logo que cessa a força, as cadeias tendem a ocupar, muito aproximadamente, as suas posições iniciais (Caetano, 2012), conforme mostrado na Figura 6.

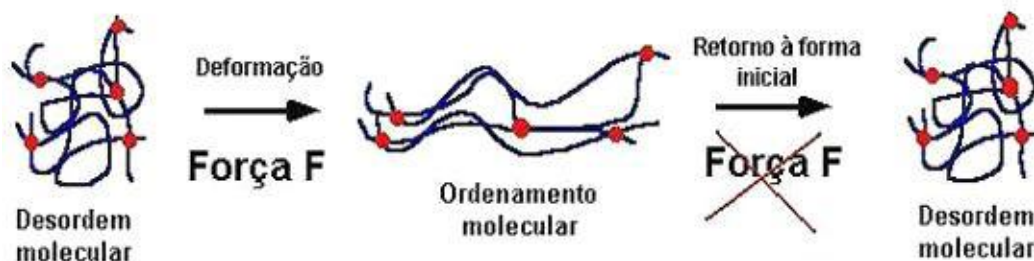


Figura 6 - Comportamento das cadeias moleculares de uma borracha vulcanizada sobre a aplicação e retirada de uma força (Caetano, 2012).

As ligações químicas entre as cadeias moleculares são de Van der Waals, que é uma ligação química fraca, e como consequência, a matéria prima é de uma consistência macia e plástica. O importante processo de vulcanização, que foi descoberto por Charles Goodyear em 1839, converte o material elastomérico bruto plástico em um de consistência sólida e elástica. Vulcanização é um processo químico, onde as longas cadeias moleculares estão ligadas entre si por ligações muito mais fortes do que as ligações de Van der Waals, e formando assim uma estrutura molecular estável e mais sólida. A ligação cruzada é ativada por uma pequena quantidade de enxofre que é misturado com o material plástico em bruto. Quando a mistura é

aquecida a cerca de 170 °C o processo de vulcanização inicia e ligações cruzadas são formadas, ligando as cadeias moleculares (Karlsson e Persson, 2003), conforme Figura 7.

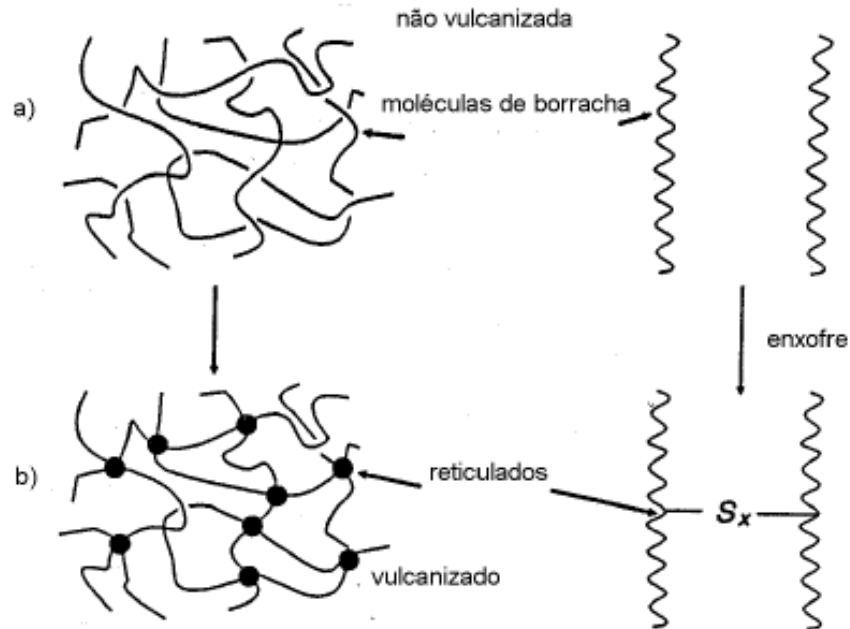


Figura 7– Representação esquemática de ligações cruzadas entre cadeias por pontes de enxofre. Borracha não vulcanizada (a) e vulcanizada (b) (Adaptado de MARK et al, 2005).

Segundo Garbim (2011) para que se possa entender um pouco melhor o efeito físico-químico da vulcanização, imagina-se que as macromoléculas da borracha no estado cru mostram-se como se fossem um emaranhado de cordas. Nesse emaranhado, as cordas deslizam umas sobre as outras sem nenhuma ligação (amarramento) que as una (Figura 7a). Porém, após o efeito da vulcanização, certos pontos das macromoléculas reticulam-se, amarrando-se ou ligando-se entre si, como se as cordas se transformassem numa gigantesca rede de pescador tridimensional (Figura 7b).

Em uma análise mais aprofundada, pode-se dizer que no ato da vulcanização, ou seja, quando o composto de borracha está sob presença de altas temperaturas, os átomos do enxofre reagem com os átomos das duplas ligações oleofílicas de carbono, bem como com os adjacentes, formando as ligações cruzadas (reticulações) entre as moléculas do elastômero (Garbim, 2011).

Na Figura 8 estão representados os diferentes tipos de ligações possíveis entre o enxofre e a borracha natural.

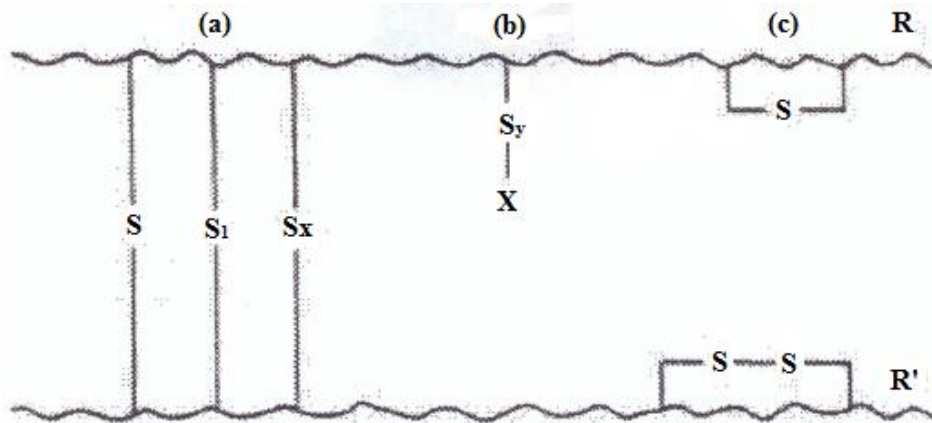
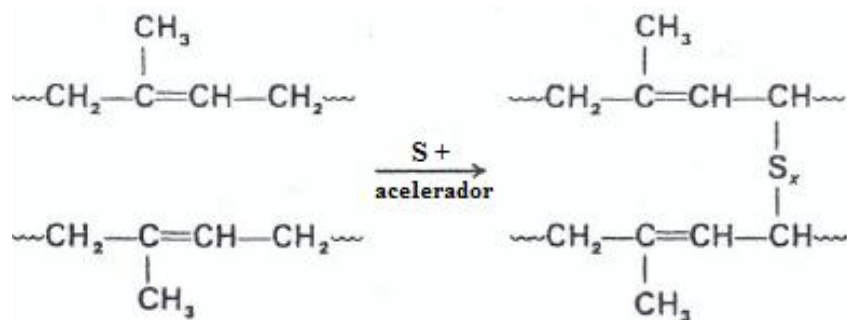


Figura 8 - Tipos de ligação que podem ser formadas entre o enxofre e a borracha natural. a) ligação na cadeia principal de duas macromoléculas de borracha R - R' com 1 enxofre (monossulfeto S), 2 enxofres (dissulfeto S₂), e x enxofres (polissulfeto S_x); b) ligação em que o enxofre e o acelerador estão pendurados na cadeia principal R; c) ligações mono e dissulfeto cíclicas (extrareticulares) R - R e R' - R' (Adaptado de Capelle, 1994).

Segundo Brydson (1988) o enxofre está envolvido a uma diversidade de reações com a borracha natural. A reação com o enxofre não é simplesmente uma reação entre duplas ligações, e há uma maior probabilidade que esta reação ocorra a um grupo metileno adjacente. Assim, uma reação típica seria



As principais propriedades que podem ser alteradas com a vulcanização são: aumento do módulo de elasticidade, diminuição da viscosidade, aumento da dureza, diminuição da solubilidade e aumento da resistência à abrasão (Callister, 2007).

A vulcanização geralmente aumenta significativamente a elasticidade, por bloqueio das cadeias umas às outras, e diminui consideravelmente a quantidade de escorregamento que as

cadeias podem sofrer. Este é o processo de reticulação. A borracha reticulada é um material muito mais estável dimensionalmente e resistente ao calor. Isto é um pouco semelhante a um colchão de mola em espiral. Se as molas não estão ligadas (borracha não vulcanizada), o colchão ira distorcer e balançar drasticamente. Ligando as bobinas (vulcanização) faz com que o colchão firme (dimensionalmente estável) e o fornece abundância de salto (elasticidade) (Ciecielski, 1999).

Uma borracha não vulcanizada é macia e pegajosa e tem baixa resistência à abrasão. O módulo de elasticidade, resistência à tração e resistência à degradação por oxidação são todos aumentados pela vulcanização. A magnitude do módulo de elasticidade é diretamente proporcional à densidade de ligação cruzada. Curvas de tensão-deformação para borrachas natural vulcanizada e natural não vulcanizada estão apresentadas na Figura 9. Para produzir uma borracha que seja capaz de grandes extensões sem rompimento das ligações de cadeia primárias, devem existir relativamente poucas ligações cruzadas, e estas devem ser largamente separadas. Borrachas úteis resultam quando cerca de 1 a 5 partes (em massa) de enxôfre são adicionadas a 100 partes de borracha. O aumento do teor de enxôfre além desta proporção endurece a borracha e também reduz a sua extensibilidade (Callister, 2007).

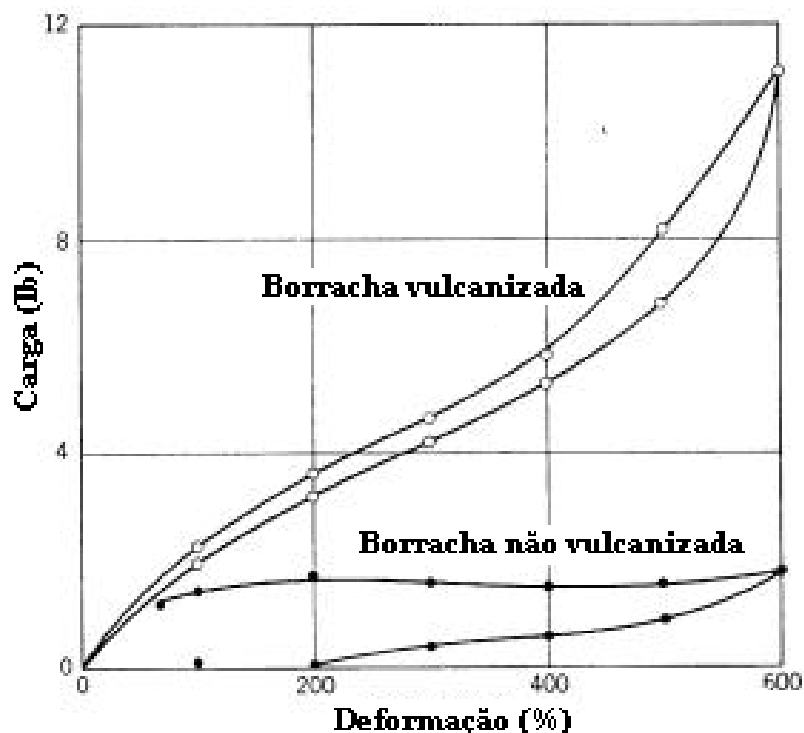


Figura 9 - Curvas de tensão-deformação até 600% de alongamento para uma borracha natural tanto não vulcanizada quanto vulcanizada (Adaptado de Billmeyer, 1971).

2.4.1 Vulcanização por Enxofre

O enxofre é de longe o mais importante agente de ligação cruzada, é relativamente barato e abundante, sendo assim vital para a indústria da borracha. Para um grande número de elastômeros, as ligações duplas (insaturação) estão em abundância na cadeia do polímero. Formam-se então ligações de enxofre de uma cadeia para outra através dessas ligações duplas. Elastômeros, tais como as borrachas naturais precisam apenas de uma pequena porcentagem destas ligações duplas para serem utilizados para produzir um produto útil, no entanto deixa-se a maior porcentagem não utilizada e, portanto, vulnerável de se atacar pelo ozônio, oxigênio e calor (Ciecielski, 1999).

A reação de pequena porcentagem de ligações duplas efetivamente utilizadas para vulcanização pode ser conseguido com 2-3 phr de enxofre em um sistema de cura convencional. Se mais de (30 phr) de enxofre é adicionado ao composto, muitos dos locais disponíveis formarão ligações cruzadas e o movimento das cadeias é tão limitado após a vulcanização que a borracha pode mal esticar. Torna-se muito rígida (sem o auxílio de qualquer material de enchimento), com uma dureza de cerca de 70, ou mais na escala Shore D, e um alongamento na ruptura em cerca de 5%. O material resultante é chamado ebonite, assim chamado porque, quando polida, se assemelhava a madeira de ébano, e de fato, antes dos dias de ebonite, plástico polido foi usado para as alças de talheres. O empacotamento denso de ligações cruzadas na ebonite reduz o inchaço da borracha em líquidos e quanto menor o número de ligações duplas, menor é o ataque pelo ozônio e luz UV. De longe, a melhor ebonite conhecida é a produzida a partir da borracha natural (Ciecielski, 1999).

2.5 ADESÃO DE BORRACHA A SUBSTRATOS

Muitos artefatos de borracha requerem um componente metálico para suportar o moldado de borracha ou melhorar a fixação do artefato a um componente de engenharia. A primeira vista, o processo de adesão é relativamente simples; aplica-se adesivo ao componente metálico, coloca-se o componente pintado no molde como inserto e molda-se a borracha. A adesão se forma com o calor e pressão concomitantemente ao processo de vulcanização da borracha. Contudo, aqueles familiarizados com a arte, sabem que se trata de

um processo envolvendo muitas variáveis, as quais precisam ser gerenciadas de forma a produzir um nível de adesão que permita o funcionamento adequado da peça. Em muitos casos, este nível de adesão é tal que a colagem resulta mais forte que o elastômero, produzindo falhas coesivas na borracha quando o esforço é levado até a ruptura, e não no adesivo ou entre o adesivo e os substratos (Gaiofatto, 2013).

Segundo Garbim (2012) a possibilidade de unir-se diretamente por via química (adesão), da borracha a outros materiais, tais como: aço, vidro, madeira, etc., dão origem a uma grande e notável simplificação na construção de elementos de máquinas feitas com borracha.

A grande resistência que se consegue na adesão por meio de vulcanização da borracha a substratos metálicos, possibilita a construção de artefatos que admitem grandes solicitações mecânicas, simultaneamente. Tais substratos metálicos constituem-se de: placas, buchas, anéis, pinos, parafusos, etc., conforme ilustrado na Figura 10 (a, b, c e d) nos quais é aderida e vulcanizada à borracha.

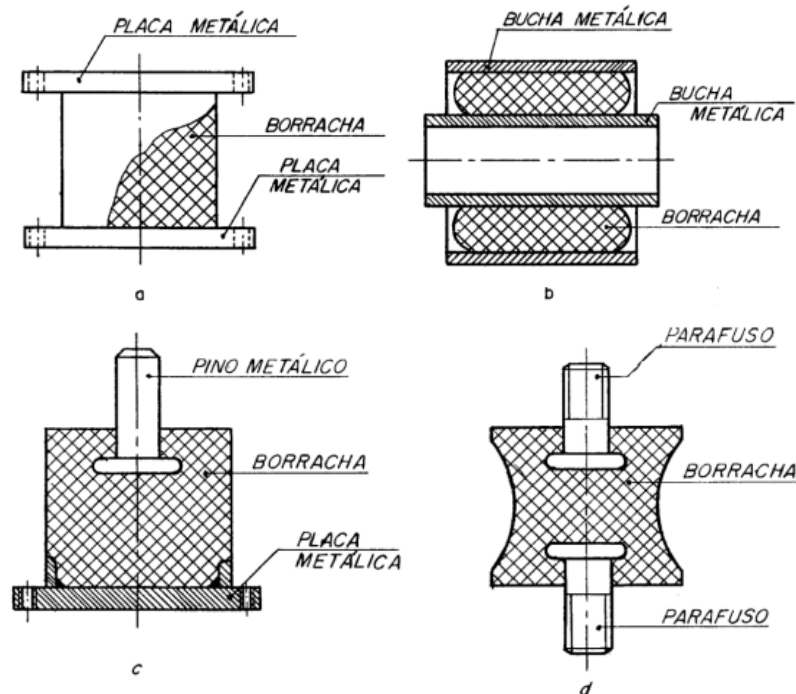


Figura 10 (a,b,c,d) – Substratos metálicos aderidos à borracha por meio de vulcanização
(Adaptado de Garbim, 2012).

2.6 CONFECÇÃO DE BUCHAS DE BORRACHA

As buchas de borracha são fabricadas por moldagem com injeção do material elastomérico entre as luvas internas e externas de metal. O material elastomérico cura e adere às luvas de metal durante o processo de vulcanização. A bucha é então estampada, isto é, a luva externa metálica é radialmente comprimida. A compressão radial é realizada para eliminar as tensões de tração induzida pelo encolhimento do elastômero durante a cura e melhorar a durabilidade. As luvas interna e externa são feitas de metal e o elastômero é geralmente um composto à base de borracha natural contendo negro de carbono, ou negro de fumo (Kadlowec et al, 2003).

Segundo Garbim (2012) na confecção de buchas de borracha aderidas ao metal por meio de vulcanização, deve-se sempre ter em conta as observações abaixo:

a) No projeto de buchas de borracha, deve-se observar que a construção do molde não forme cavidades ou protuberâncias no corpo de trabalho da bucha.

b) Observar a perfeita disposição dos substratos metálicos que integrarão a bucha, e serão unidos pela vulcanização à borracha, de forma a permitir certa facilidade ao se extrair a peça do molde.

c) É de boa prática, sempre colocar primeiro o substrato metálico na cavidade do molde, e em seguida alimentar com borracha para prensagem e vulcanização; nunca proceder ao contrário.

d) Os substratos metálicos que integrarão a bucha de borracha, não deverão apresentar nenhuma aresta cortante, que venham provocar cortes à borracha quando deste conjunto em funcionamento.

e) O molde deverá ser projetado e construído de tal forma que, no ato da prensagem e vulcanização, não penetre borracha nas roscas ou partes que comprometa a desmoldagem da peça pronta.

f) No projeto de uma bucha de borracha, não se deve impedir a contração natural que ocorre no resfriamento da peça após vulcanização, pois, caso contrário, podem ocorrer elevadas tensões internas, que comprometam o bom desempenho da bucha de borracha em seu funcionamento.

2.7 TIPOS BÁSICOS DE BUCHAS DE BORRACHA

Segundo Eugênio (2006) são três os tipos básicos de buchas elastoméricas:

1 – Bucha moldada

Com projeto particularmente simples e barato, este componente continua sendo muito utilizado atualmente. A bucha moldada é feita a partir de um tubo metálico sobre o qual é feita a injeção do elastômero, conforme Figura 11. Este tipo de bucha é projetado para ser pressionado dentro de um furo cilíndrico, em uma ligação da suspensão, onde é mantido no lugar por pré-tensão radial e anéis de retenção axial. Quando comparada com outros tipos de buchas tubular este tipo é limitado no que diz respeito à transferência de força axial (Heibing, 2011).



Figura 11 – Exemplo de bucha moldada (Adaptado de Heibing, 2011).

A falta do tubo na superfície externa faz com que este tipo de bucha seja particularmente barato. O furo de montagem na ligação da suspensão não requer nenhum tipo de usinagem de acabamento, o que leva a economias de custos adicionais. A bucha moldada geralmente oferece uma boa resistência à fadiga (Heibing, 2011; Eugênio, 2006).

2 – Bucha com dois tubos

Este é o tipo mais utilizado atualmente em veículos. O elastômero é aquecido e injetado entre dois tubos (interno e externo) aderindo às paredes dos mesmos. A Figura 12 apresenta um exemplo de bucha de dois tubos (Eugênio, 2006).



Figura 12 – Exemplo de bucha de dois tubos (Adaptado de Heibing, 2011).

Este tipo de bucha permite que ao se projetar os diâmetros das luvas interna e externa e a proporção entre a espessura e o comprimento da camada de borracha, a rigidez axial e radial da bucha de borracha seja mais precisamente ajustada para atender as condições de uso (Heibing, 2011).

3 – Bucha com dois tubos e alma

Este é um tipo convencional de bucha com dois tubos onde o elastômero é separado por um terceiro tubo (alma), conforme Figura 13, que pode ser plástico ou metálico, obedecendo ao mesmo processo de produção por injeção da borracha. Este tubo intermediário gera uma maior resistência radial e reduz o deslocamento axial do tubo externo em relação ao tubo interno, ou seja, a bucha fica mais rígida. Os três tipos de buchas citadas têm o elastômero como componente principal (Eugênio, 2006).



Figura 13 – Exemplo de bucha de dois tubos e alma (Adaptado de Heibing, 2011).

2.8 PROPRIEDADES DO MATERIAL

Uma breve introdução a vários aspectos das propriedades mecânicas da borracha é apresentada. Note que a borracha não é um material, mas sim um termo amplamente utilizado, incluindo uma grande variedade de materiais muito originais, todos com propriedades altamente individuais. Assim, as propriedades descritas certamente não se aplicam a todas as borrachas. Embora a ênfase dada às borrachas naturais vulcanizadas, outros materiais como borrachas sintéticas, como os elastômeros termoplásticos apresentam um comportamento mecânico similar, embora a composição química seja bastante diferente.

2.8.1 Estrutura Molecular

A borracha vulcanizada consiste de longas moléculas reticuladas de polímero que compõem uma matriz altamente elástica. Para quase todas as aplicações de engenharia, uma carga de reforço, geralmente o negro de fumo, é adicionado ao composto de borracha. A Figura 14 apresenta um esquema da microestrutura da borracha vulcanizada. As partículas finas de enchimento formam uma estrutura dentro do material. Durante a vulcanização, a estrutura de enchimento forma ligações físicas e químicas com as cadeias poliméricas. Dependendo da aplicação, pode haver várias razões para a introdução de cargas, tais como aumento da rigidez, amortecimento, resistência à abrasão e resistência ao rasgamento. Em outros casos, as cargas são introduzidas simplesmente para reduzir os custos de material (Olsson, 2007).

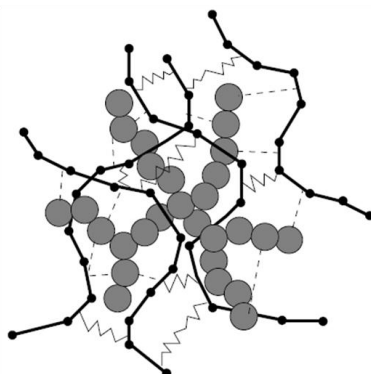


Figura 14 - Microestrutura para uma borracha vulcanizada com enchimento de negro de fumo. Círculos cinza: partículas de carbono. Linhas sólidas: cadeias de polímeros.

Ziguezague e linhas tracejadas: ligações cruzadas (Olsson, 2007).

2.8.2 Viscoelasticidade

A viscoelasticidade é definida como o fenômeno pelo qual o material polimérico apresenta características de um fluido e de um sólido elástico ao mesmo tempo. A fração elástica da deformação aparece devido a variações do ângulo e a distância de ligação entre os átomos da cadeia polimérica (tanto da principal quanto de grupos laterais). A fração plástica ocorre por causa do atrito entre as cadeias poliméricas. Isso faz com que o material demore um tempo finito para responder à solicitação, gerando uma defasagem entre a solicitação e a resposta (Canevarolo Jr, 2002).

Dessa forma, pode-se definir a viscoelasticidade como a propriedade de um material exibir tanto comportamento elástico quanto viscoso. Os materiais viscoelásticos têm características tanto de sólido (elasticidade, resistência ao fluxo e estabilidade da forma) quanto de fluido, tais como a dependência do fluxo com o tempo, temperatura e tensão aplicada.

Segundo Callister (2007) um polímero amorfo pode se comportar como um vidro a baixas temperaturas, um sólido tipo borracha (elastomérico) em temperaturas intermediárias (acima da temperatura de transição vítrea) e um líquido viscoso quando a temperatura é elevada mais ainda. Para deformações relativamente pequenas, o comportamento mecânico a baixas temperaturas pode ser elástico; isto é, em conformidade com a lei de Hooke,

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

Onde, σ – Tensão; E – Módulo de elasticidade; ε – Deformação.

Na mais alta temperatura, prevalece o comportamento viscoso ou tipo líquido. Para temperaturas intermediárias é encontrado um sólido tipo borracha que exibe as características mecânicas combinadas destes 2 extremos; a condição é denominada viscoelasticidade.

A deformação elástica é instantânea, o que significa que a deformação total ocorre no instante em que a tensão é aplicada ou aliviada (isto é, a deformação é independente do tempo). Em adição, após o alívio da tensão externa, a deformação é totalmente recuperada e a

amostra assume suas dimensões originais. O comportamento está representado na Figura 15 (b) como deformação versus tempo para a curva carga instantânea-tempo, mostrado na Figura 15 (a).

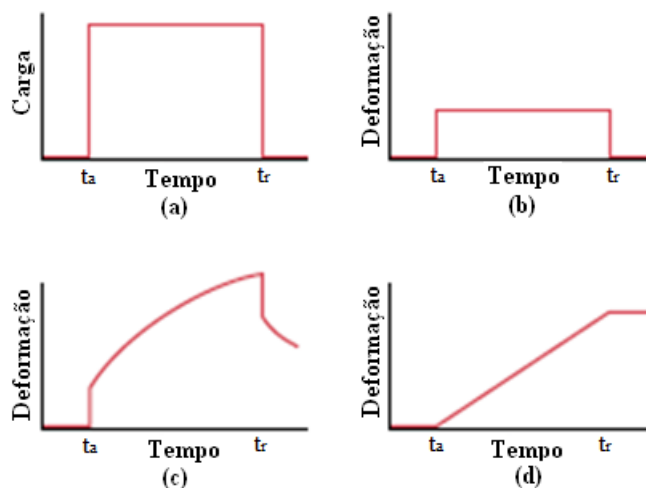


Figura 15 (a) Carga em função do tempo, onde a carga é aplicada instantaneamente no tempo t_a e aliviada no tempo t_r . Para o ciclo carga-tempo em (a), as respostas deformação versus tempo são para comportamentos totalmente elásticos (b), viscoelásticos (c) e viscosos (d) (Adaptado de Callister, 2007).

Para comportamento totalmente viscoso, a deformação não é instantânea; isto é, em resposta a uma tensão aplicada, a deformação acontece com atraso ou deforma dependente do tempo. Também, esta deformação não é reversível ou completamente recuperável após a tensão ter sido aliviada. Este fenômeno é demonstrado na Figura 15 (d).

Para o comportamento viscoelástico, a imposição de uma tensão da forma apresentada na Figura 15 (a) resulta numa deformação instantânea, que é seguida por uma deformação viscosa, dependente do tempo, uma forma de anelasticidade, este comportamento está ilustrado na Figura 15 (c).

Drozdov (1996) afirma que para um material ser considerado viscoelástico, é necessário que o mesmo experimente os fenômenos de fluência e relaxação de tensões. Esses fenômenos estão associados à combinação dos efeitos elásticos e viscosos, podendo ser representados por diversos modelos reológicos cujo comportamento peculiar é função do arranjo em associação dos elementos básicos: mola (representando a parcela elástica) e amortecedor (representando a parcela viscosa), que podem caracterizar sólidos viscoelásticos ou fluidos viscoelásticos.

2.8.3 Amortecimento e Módulo Dinâmico

Existem diferenças entre as curvas de carga e descarga em um diagrama de tensão em função da deformação, quando uma carga cíclica é aplicada sobre um material de borracha. Este fenômeno é denominado histerese. A energia que é dissipada em cada ciclo é representada pela área fechada U_c , criada pelas curvas de carga e descarga, conforme Figura 16. Esta energia se dissipa principalmente na forma de calor. É a energia dissipada que faz com que em vibrações mecânicas a amplitude de vibração venha a diminuir, e esta propriedade do material é denominada amortecimento (Karlsson e Persson, 2003).

A origem da propriedade de amortecimento da borracha pode ser entendida a partir da sua estrutura molecular. A borracha vulcanizada é composta de longas moléculas de polímero reticuladas. O amortecimento é aumentado quando material de enchimento, geralmente negro de fumo, é adicionado ao composto de borracha. Negro de fumo consiste de partículas muito pequenas de carbono (20 nm - 50 μ m), que são misturadas a borracha em bruto antes da vulcanização. O material é, portanto, um material de duas fases formado por constituintes, com completamente diferentes propriedades mecânicas (Karlsson e Persson, 2003).

A propriedade de amortecimento de borrachas preenchidas, isto é, a capacidade de dissipar energia mecânica em calor, é principalmente devido a dois tipos de mecanismos. Um deles é de carácter viscoso - a origem do amortecimento viscoso vem da resistência na reorganização das cadeias moleculares dentro da fase de borracha. Esta reorganização das longas cadeias moleculares não pode ocorrer instantaneamente, gerando uma taxa de resistência dependente de um carácter viscoso. O outro mecanismo é devido ao material de enchimento, o amortecimento é aumentado pela adição de agentes de enchimento ao composto de borracha. As partículas de enchimento podem ser consideradas como rígidas em comparação com a rigidez da matriz de borracha. As partículas de carga como mencionado anteriormente, se aglomeram e geram a construção de uma estrutura de enchimento dentro da rede de borracha. Quando o material de borracha está sendo deformado, forças são desenvolvidas nas interfaces do material de enchimento o que pode ocasionar a ruptura do enchimento. O aumento do amortecimento deve, portanto, ser atribuído a uma resistência das interfaces de borracha e carbono e nas interfaces de carbono-carbono (Karlsson e Persson, 2003).

Várias maneiras diferentes para caracterizar o amortecimento e o módulo dinâmico podem ser encontradas na literatura. O módulo dinâmico e o ângulo de fase são utilizados aqui para caracterizar as propriedades dinâmicas do material estudado. A definição desses parâmetros têm a sua origem no comportamento dinâmico linear de materiais viscoelásticos. Uma maneira comum de descrever as características dos materiais viscoelásticos lineares é em termos de um módulo complexo. O módulo complexo é composto por uma parte real (módulo de armazenamento) e uma parte imaginária (módulo de perda). Outra forma de descrever o módulo complexo é em termos de valor absoluto (módulo dinâmico) e ângulo de fase.

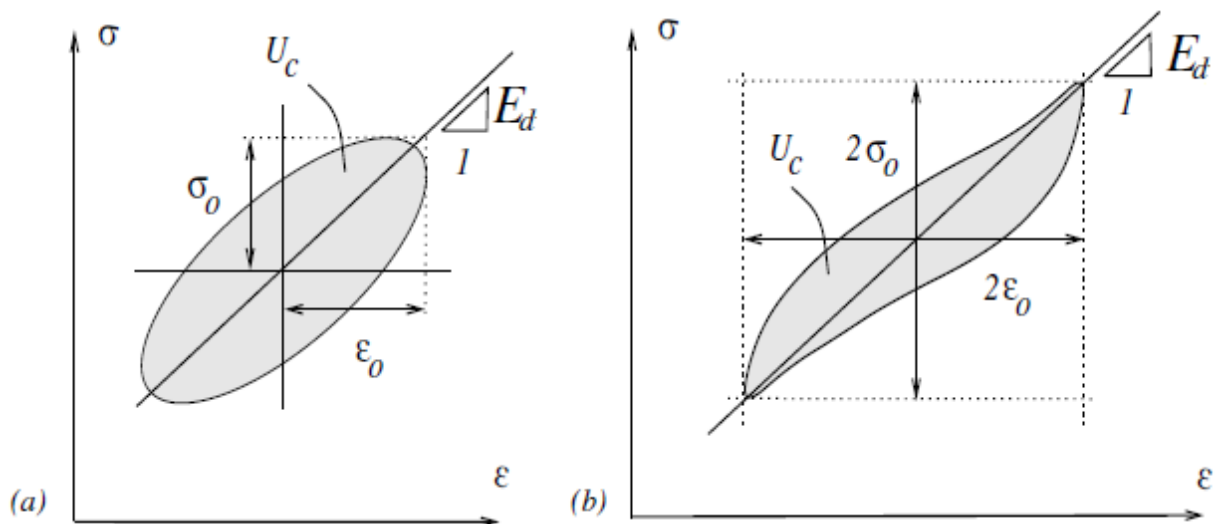


Figura 16 - Laço de histerese típico de cisalhamento harmônico, em (a) comportamento linear e (b) comportamento não-linear (Adaptado de Karlsson e Persson, 2003).

A Figura 16 (a) corresponde ao comportamento linear (viscoelástico), que é caracterizado por uma forma elíptica. A Figura 16 (b) é mais geral, onde não-linearidades estão presentes. O comportamento não linear aparece como uma distorção do ciclo de histerese. Estas não linearidades são devido a elasticidade não-linear e / ou ao amortecimento de atrito (quebra da estrutura de enchimento e reforma).

Uma vez que as propriedades dinâmicas da borracha são não lineares, não é inteiramente adequado descrever as características em termos de um módulo complexo. Com base no ciclo de histerese da Figura 16, as duas seguintes definições de módulo de elasticidade dinâmico, E_d , e de amortecimento, d_{am} , têm sido utilizados em toda a dissertação.

O módulo de elasticidade dinâmico corresponde ao ângulo de inclinação do ciclo de histerese e é determinado pela Equação 2:

$$E_d = \frac{\sigma_0}{\varepsilon_0} \quad (2)$$

Como visto na Figura 16, σ_0 é a amplitude de tensão, ε_0 é a amplitude de deformação.

A energia dissipada U_c para cada ciclo de tensão esta relacionada com o ângulo de fase segundo a Equação 3.

$$U_c = \pi \sigma_0 \varepsilon_0 \text{sen}(\delta) \quad (3)$$

O amortecimento d_{am} pode ser determinado pela Equação 3:

$$d_{am} = \text{sen}(\delta) = \frac{U_c}{\pi \sigma_0 \varepsilon_0} \quad (4)$$

Para ângulos de fase pequenos é de notar que,

$$\text{sen}(\delta) \approx \delta \approx \text{tg}(\delta) \quad (5)$$

2.8.4 Dependência da Taxa de Aplicação da Carga

É um fato bem conhecido que a resposta de componentes de borracha é influenciada pela taxa de aplicação da carga. No caso de uma carga harmônica, a dependência da taxa de aplicação da carga ou a dependência da frequência é mostrada como um aumento no módulo dinâmico com frequência crescente, como pode ser visto na Figura 17. Para valores de frequências crescentes o fator de perda vai aumentar em baixas frequências, atingir um valor máximo e depois diminuir a frequências muito elevadas.

A perda pela dependência da taxa de aplicação da carga é geralmente atribuída à resistência na reorganização das cadeias poliméricas durante o carregamento. Uma vez que

esta reorganização não pode ocorrer instantaneamente, a perda de energia será dependente da taxa de aplicação da carga (Olsson, 2007).

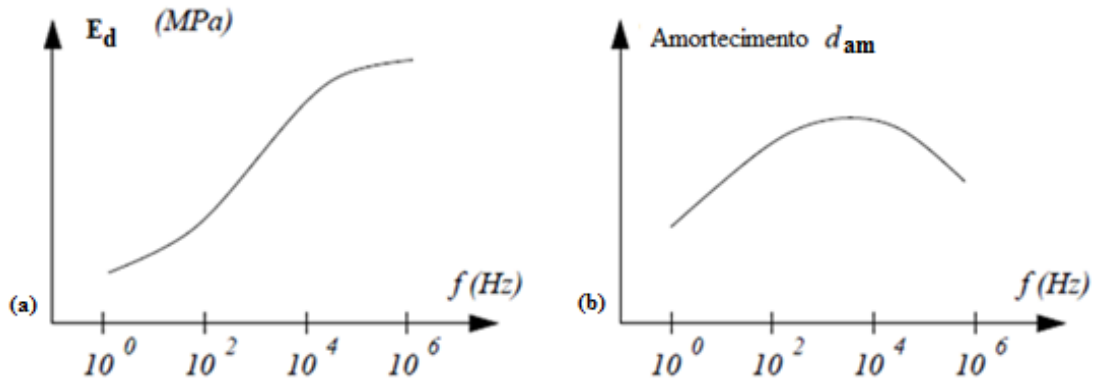


Figura 17 - Dependência do módulo dinâmico (a) e amortecimento (b) da frequência para uma borracha com carga reforçante de negro de fumo (Adaptado de Olsson, 2007).

A Figura 18 mostra a dependência do módulo dinâmico e ângulo de fase da frequência para uma borracha natural preenchida. O módulo dinâmico e ângulo de fase são mostrados em função da frequência. O efeito da alteração da temperatura é também mostrado na mesma figura. Os valores indicados são aproximados e fortemente dependentes também da amplitude.

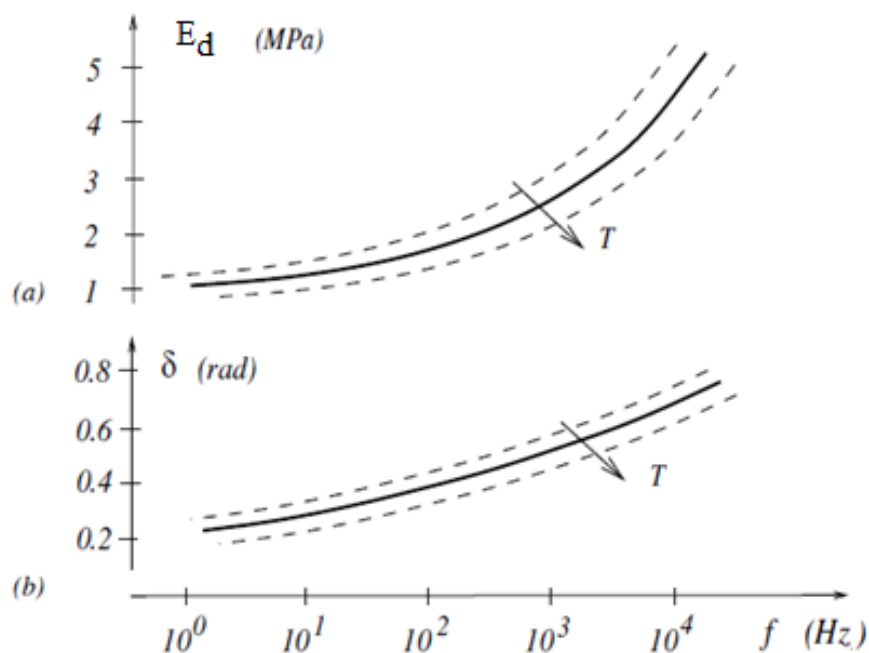


Figura 18 - Dependência do módulo dinâmico (a) e ângulo de fase (b) da frequência para uma borracha natural com carga reforçante de negro de fumo. A influência da temperatura é também mostrada (Adaptado de Karlsson e Persson, 2003).

2.8.5 Dependência da Temperatura

A Figura 19 mostra a dependência do módulo dinâmico e ângulo de fase da temperatura para uma borracha com carga. Os valores dados são aproximados e dependentes também da amplitude. O módulo de elasticidade dinâmico diminui com o aumento da temperatura. O efeito da alteração da frequência também é mostrado na figura.

Três regiões de temperatura são indicadas. A primeira é a região vítrea onde o movimento térmico das moléculas do polímero é reduzido. Nesta região, quase nenhum movimento intermolecular é possível e o material apresenta-se como um vidro e quebradiço. O comportamento mecânico da borracha neste intervalo de temperatura é dependente das ligações inter-atômicas. O módulo é consideravelmente elevado (aproximadamente 1 GPa) nesta região, enquanto o amortecimento representado pelo ângulo de fase é baixo. A segunda região é a região de transição, com uma queda drástica no módulo dinâmico e com amortecimentos máximos mostrados como um pico no ângulo de fase. A terceira região de temperatura é a região de borracha com um módulo dinâmico consideravelmente baixo (aproximadamente 1 MPa). Borrachas nas condições de trabalho devem estar no final da região de transição ou na região de borracha, a fim de ter propriedades semelhantes à borracha (Karlsson e Persson, 2003).

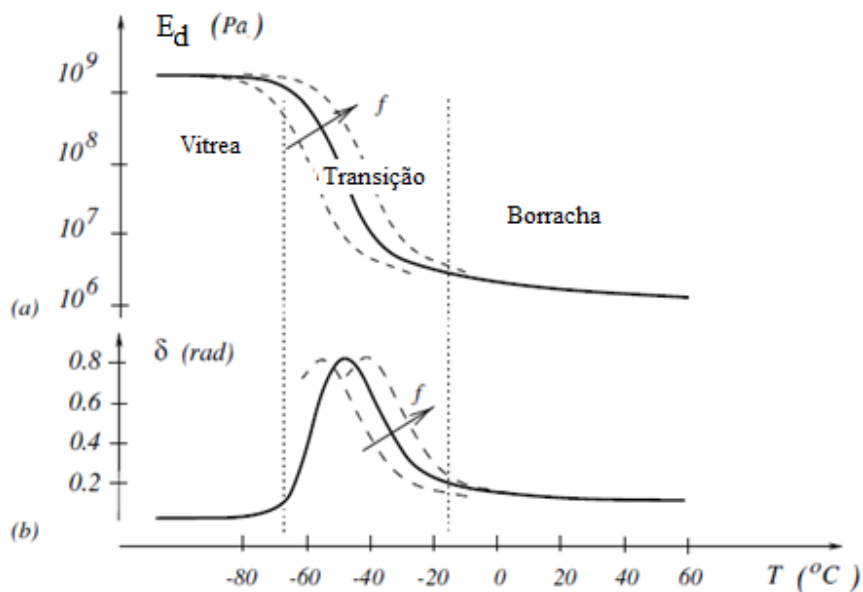


Figura 19 - A dependência do módulo dinâmico (a) e do ângulo de fase (b) da temperatura para uma borracha natural com carga reforçante de negro de fumo. A influência da frequência é também mostrada (Adaptado de Karlsson e Persson, 2003).

2.8.6 Dependência da Amplitude de Deformação

A dependência da amplitude de deformação, também conhecida como Efeito Fletcher-Gent (Fletcher, 1953) ou Efeito Payne (Payne, 1965), geralmente não é tão conhecida como a dependência da taxa de aplicação da deformação, embora em muitos casos, a dependência da amplitude de deformação é de longe a mais proeminente das duas.

O efeito da dependência da amplitude de deformação para uma borracha carregada harmonicamente é ilustrada na Figura 20. Como pode ser observado, um aumento na amplitude de deformação levará a uma diminuição no módulo dinâmico. O amortecimento, por outro lado, irá atingir um valor máximo em amplitudes de deformação moderada.

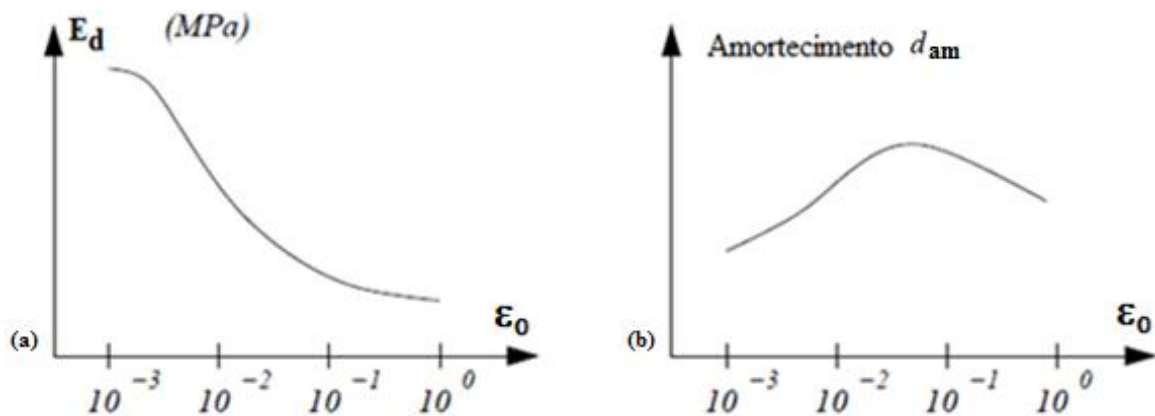


Figura 20 - Dependência do módulo dinâmico (a) e amortecimento (b) da amplitude de deformação para uma borracha natural com carga (Adaptado de Olsson, 2007).

Do ponto de vista da micromecânica, a dependência da amplitude de deformação é atribuída à ruptura e à reforma da estrutura de enchimento. A estrutura é composta de agregados mantidos juntos por ligações de Van der Waals (Olsson, 2007).

Payne (1965) descobriu que o módulo de elasticidade é quase recuperado no retorno a amplitudes de deformações pequenas, isto é, a estrutura de enchimento, em grande parte reforma para um ciclo de amplitude. É evidente que os mecanismos envolvidos não devem ser confundidos com o Efeito Mullins, o que é atribuído à quebra das ligações cruzadas entre o material de enchimento e o material elastomérico com tempos de recuperação de cerca de 24 horas. Para resumir, cabe concluir que o Efeito Payne tem um curto período de recuperação, enquanto o Efeito Mullins tem um longo tempo de recuperação.

Uma propriedade importante do comportamento dinâmico de borrachas preenchidas é a possibilidade de separar os efeitos da taxa de aplicação da deformação e amplitude de deformação, como ilustrado na Figura 21.

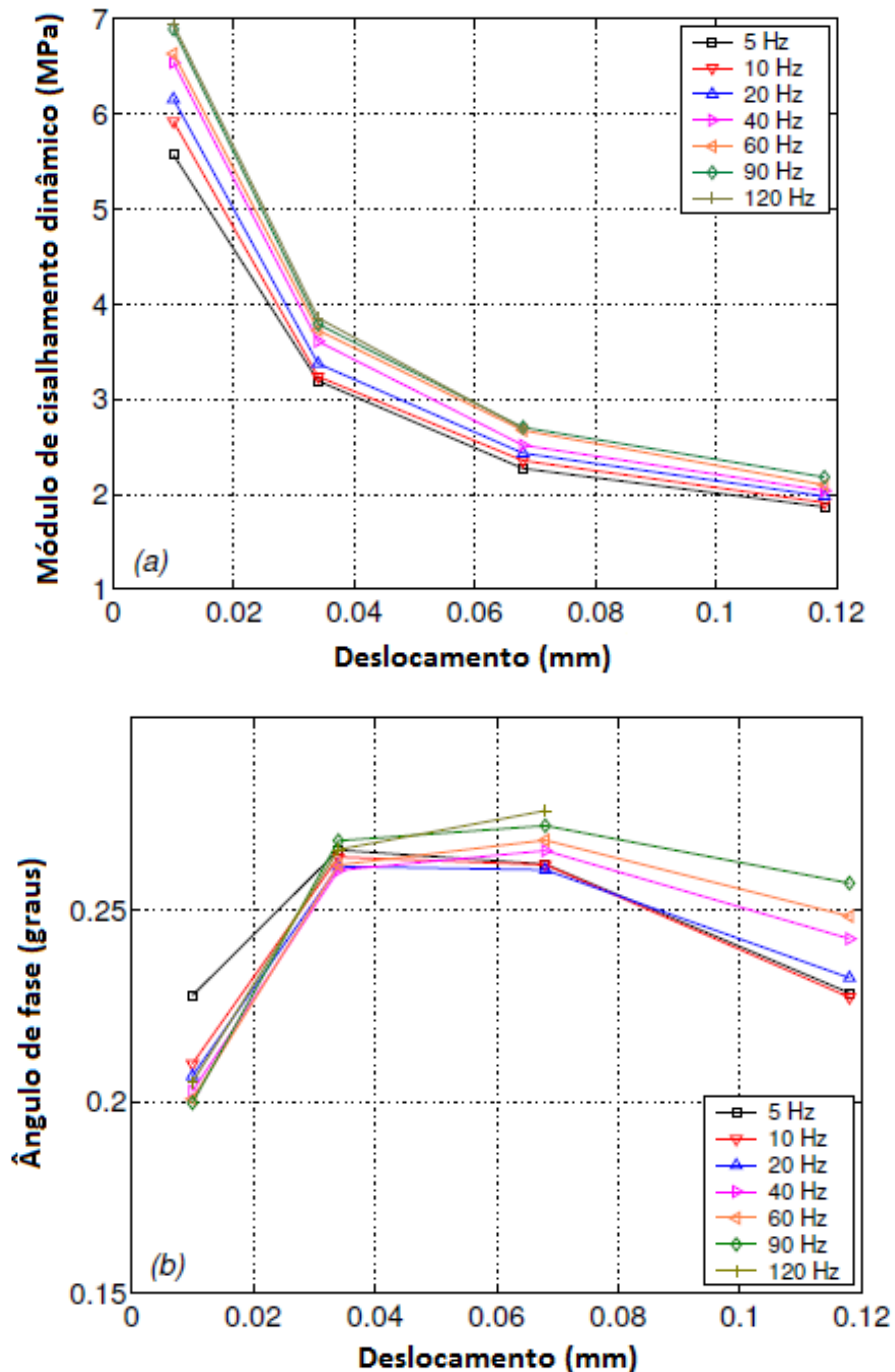


Figura 21 - Separação dos efeitos da frequência e amplitude. Módulo dinâmico (a) e do ângulo de fase (b) em função da amplitude de deformação para frequências diferentes.

Borracha natural, com dureza 60 Shore A. (Adaptado de Karlsson e Persson, 2003).

2.8.7 Efeito Mullins

A resposta mecânica dos elastômeros apresenta várias características interessantes. Sabe-se, por exemplo, a partir do trabalho de Mullins (Mullins, 1969), que borrachas vulcanizadas que contenham materiais de enchimento têm a sua curva tensão/deformação alteradas quando são deformadas, ou seja, no caso de uma carga cíclica, durante os primeiros ciclos de carga e descarga a borracha sofre uma significativa diminuição da rigidez e, ao fim de um determinado número de ciclos, a sua resposta torna-se repetitiva. Esta diminuição da rigidez da borracha é caracterizada pela diminuição da força necessária à sua deformação para o mesmo nível de extensão (Brown, 2006).

Quando um elastômero é deformado a partir de um estado virgem, por exemplo, num ensaio uniaxial de tração, e depois desta deformação a força é retirada, e se traciona novamente o corpo de prova até atingir o nível de deformação anterior, a força necessária é inferior, conforme apresentado na Figura 22. Este fenómeno de diminuição da rigidez é conhecido por Efeito Mullins (Mullins, 1969) e reflete o dano infligido durante os primeiros ciclos de carga.

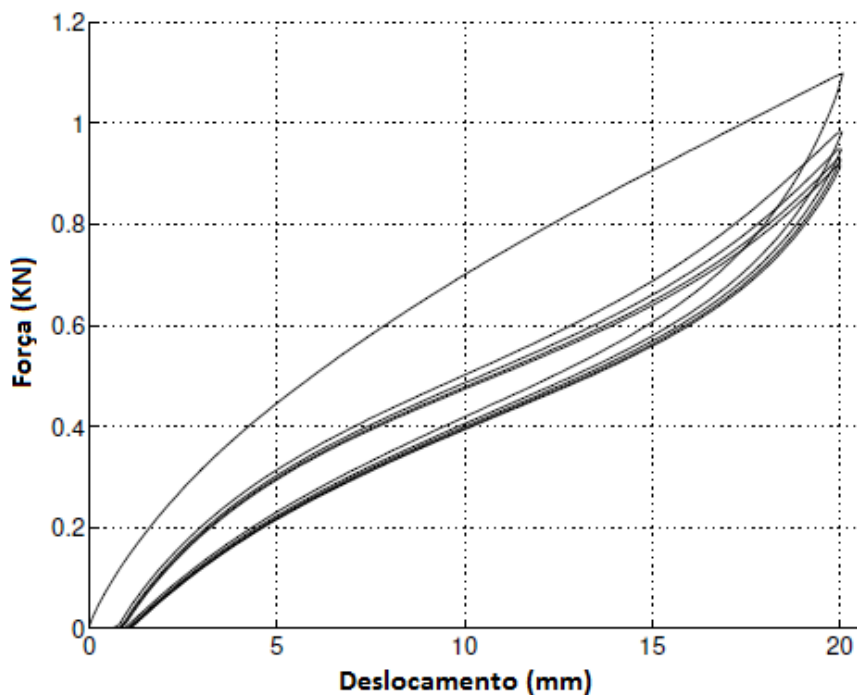


Figura 22 – Relação força em função do deslocamento para uma borracha vulcanizada exposta a ciclos de carga e descarga. O Efeito Mullins pode ser claramente observado (Adaptado de Karlsson e Persson, 2003).

O Efeito Mullins é atribuído à ruptura das ligações cruzadas entre o material de enchimento e o material elastomérico. Esta quebra de ligações cruzadas entre o material de enchimento e o material elastomérico tem um tempo de recuperação de menos de 24 horas, e a rigidez do material virgem ficará pelo menos parcialmente restaurada (Mullins, 1969).

2.8.8 Efeito das Cargas

Segundo Gheller (2007), as cargas, quando adicionadas em sistemas poliméricos, acarretam consideráveis alterações nas propriedades dinâmicas dos compostos, tanto nos módulos elástico e viscoso como também no fator de perda (*loss factor*). Em termos práticos, a absorção ou perda de energia de produtos de borracha durante deformações dinâmicas são de grande importância. Como exemplo pode-se citar sistemas elastoméricos de absorção de vibração em automotores, que, na medida em que são submetidos a deformações cíclicas, podem ter sua vida útil diminuída em função do desenvolvimento de calor ocasionado por valores elevados do módulo viscoso.

Elastômeros vulcanizados apresentam uma histerese bastante dependente do teor de carga a ser adicionada no material. As características importantes das cargas para o reforço da borracha são: área superficial, estrutura da partícula, tamanho do agregado, interação carga-borracha e interação carga-carga. Estas características também influenciam nas propriedades viscoelásticas dos compostos.

Um aumento na área superficial, mantendo o teor de carga, conforme apresentado na Figura 23 acarreta em um aumento na rede de cargas, conforme comprovado por Payne em seu estudo (Payne, 1965) e também apresentado por Shaefer (1995).

Na Figura 23, o número “BET” corresponde à área superficial da partícula determinada por absorção de nitrogênio e o “DBPA” corresponde à estrutura do negro de fumo determinada por absorção de di-butilftalato.

Observa-se que, em baixas deformações, a área superficial é um parâmetro que influencia significativamente no módulo elástico, porém, em deformações maiores, a estrutura é que direciona para um maior ou menor valor do módulo elástico.

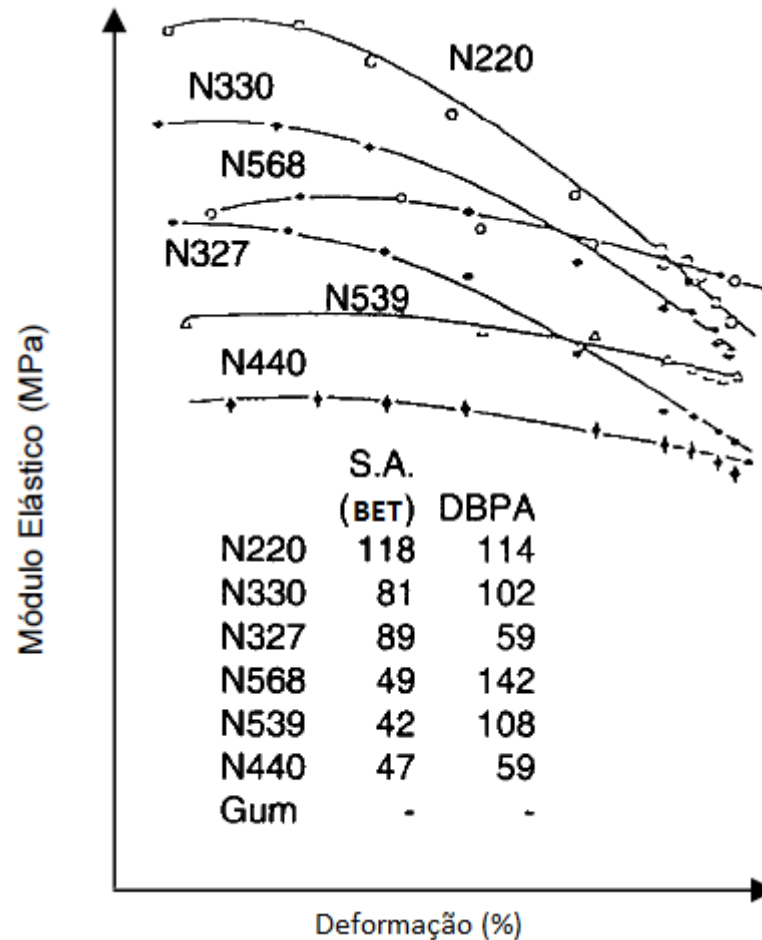


Figura 23 - Efeito da área superficial e da estrutura do negro de fumo no módulo elástico em um composto de borracha carregado com 50 phr de diferentes tipos de carga (Adaptado de Shaefer, 1995).

Segundo Grison (2010) as cargas podem ser agrupadas de acordo com as melhorias das propriedades que proporcionam nos artefatos, conforme apresentado abaixo.

1 – Cargas de uso geral: Alumina; Carbonato de cálcio; Sulfato de cálcio; Sílica precipitada (SiO_2); Talco; Mica; Óxido de zinco; Sulfato de bário; Caulins tratados; Negros de fumo; Diatomita; Bentonita.

2 – Cargas retardantes de chama: Alumina; Trióxido de antimônio; Trióxido de arsênio; Carbonato de magnésio; Teflon em pó.

3 – Cargas resistentes a radiações nucleares: Litargírio (óxido de chumbo); Carbetto de boro.

4 – Cargas que melhoram a usinagem: Sílica; Carbonato de cálcio; Polímeros orgânicos rígidos; Talco.

5 – Cargas que melhoram a condutividade térmica: Alumínio em pó; Alumina; Sílica precipitada; Óxido de zinco; Silicatos; Caulim.

6 – Cargas que melhoram a absorção de calor: Metais em pó; Óxidos metálicos; Sílica precipitada (SiO_2); Silicatos.

7 – Cargas que melhoram a resistência elétrica: Alumina; Sílica (SiO_2); Talco; Mica; Caulim; Dióxido de titânio.

8 – Cargas que melhoram a condutividade elétrica: Metais em pó; Grafite; Negros de fumo da série N-200; Alguns óxidos metálicos.

9 – Cargas que melhoram a resistência à tração: Negros de fumo em geral; Sílica precipitada; Fibras; Materiais poliméricos.

10 – Cargas que aumentam a resistência à compressão: Negros de fumo das séries N-200 e N-300; Sílica precipitada (SiO_2); Materiais poliméricos.

11 – Cargas que melhoram a resistência ao impacto: Cargas reforçadoras em geral (negros de fumo, sílica); Materiais poliméricos elásticos; Plastificantes.

12 – Cargas que melhoram a resistência ao desgaste por abrasão: Negros de fumo alta estrutura; Sílica; Carbetos de silício.

2.8.9 Efeitos da Vulcanização Sobre as Propriedades do Elastômero

Os principais efeitos da vulcanização sobre as propriedades do elastômero são representados na Figura 24. É digno de nota, entretanto, que estas propriedades não são funções apenas da densidade de reticulação, mas também são afetadas pelo tipo e estrutura do reticulado, natureza do polímero, tipo e quantidade de carga adicionada, entre outros.

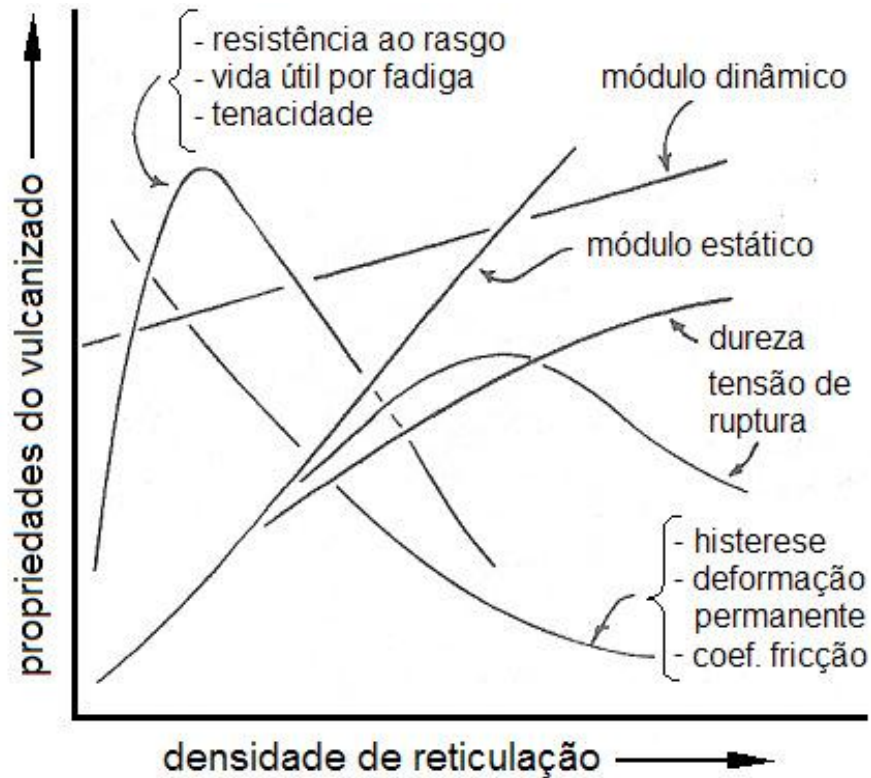


Figura 24 - Efeitos da densidade de reticulação sobre as propriedades dos elastômeros vulcanizados (Adaptado de Eirich, 1978).

Observa-se que ambos os módulos estático e dinâmico aumentam com a densidade de reticulação, porém em diferentes extensões. A razão para este comportamento diferenciado é que o módulo dinâmico aqui representado é composto das componentes viscosa e elástica, enquanto o módulo estático é a medida apenas da resposta elástica. A vulcanização, portanto, provoca uma mudança do comportamento plástico ou viscoso para o elástico. Tanto a resistência ao rasgo quanto a vida útil por fadiga e tenacidade aumentam rapidamente com uma pequena densidade de reticulação, mas acabam diminuindo com o subsequente aumento do número de ligações cruzadas. Estas propriedades estão relacionadas com a energia de ruptura. A histerese é uma medida da energia de deformação que não é armazenada na rede do reticulado, mas convertida em calor; observa-se que esta propriedade diminui com o aumento do número de cadeias elasticamente efetivas. Como as propriedades relacionadas com a energia de ruptura aumentam com o grau de reticulação e com a histerese, elas acabam apresentando um máximo para densidades de reticulação intermediárias (Eirich, 1978).

Um aumento no teor do agente de cura (no caso o enxofre) em compostos de borracha natural carregados com negro de fumo aumenta o módulo elástico do composto elastomérico

(Payne, 1965). Na Tabela 2 são apresentados alguns valores do módulo elástico obtidos de compostos à base de borracha natural vulcanizados com diferentes teores de enxofre:

Tabela 2 - Variação do módulo elástico em função do teor de enxofre em um composto à base de borracha natural (Payne, 1965).

| Teor de enxofre, % | Módulo Elástico a baixas deformações (N/m ²) |
|--------------------|--|
| 0,1 | 0,81 |
| 0,5 | 0,92 |
| 1,0 | 0,95 |
| 5,0 | 1,53 |

2.8.10 Influências da Massa Molar e Distribuição da Massa Molar

A distribuição da massa molar do polímero pode afetar nas propriedades dinâmicas do polímero. Moléculas de baixa massa molar na matriz funcionam como lubrificantes internos que promoverão o fluxo ou deslizamento intermolecular, diminuindo o módulo elástico do material. Por outro lado, moléculas de alta massa molar ocasionam um aumento do módulo elástico. Compostos com elastômeros de alta massa molar apresentam menor histerese que aqueles com menor massa molar (Gheller, 2007).

2.8.11 Outras Propriedades

Além das propriedades apresentadas neste capítulo, há também outras propriedades importante e que devem ser mencionadas. O ambiente de trabalho também apresenta preocupações, como o envelhecimento e inchaço. Reações de oxidação, muitas vezes em combinação com o envelhecimento térmico, podem reduzir drasticamente a vida útil de um componente de borracha. Isto é especialmente verdadeiro para os componentes finos, uma vez que o processo de envelhecimento se inicia na superfície. Além disso, muitos produtos químicos, tais como óleos são conhecidos por destruir as reticulações, assim, revertendo à borracha para o estado de goma, e também causando o inchamento. Dependendo da aplicação do componente de borracha, e ao meio ambiente em que será utilizado, diferentes propriedades têm de ser consideradas durante a fase de concepção do mesmo (Olsson, 2007).

Segundo Grison (2010) as seguintes considerações sobre a borracha natural podem ser feitas:

- a borracha natural não resiste aos derivados de petróleo (solventes, óleos, combustíveis, lubrificantes) nem ao ozônio, à radiação solar (UV) e ao intemperismo (luz, variação de temperatura, gases, poeiras, umidade).

- a borracha natural é compatível com a maioria dos elastômeros ou borrachas. As melhores propriedades mecânicas da borracha ocorrem quando ela tem a menor aditivação de componentes. Quanto maior a quantidade de produtos a ela incorporados menor a sua resistência, resiliência, flexibilidade e elasticidade. Como ela se degrada facilmente sob o efeito da luz e do calor, esta é aditivada com agentes de proteção: antioxidantes e antiozonantes que garantem longa durabilidade.

Capítulo 3

MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 OBJETO DE ESTUDO

O material utilizado no desenvolvimento experimental do trabalho foi uma bucha de borracha comercialmente disponível. A Bucha de borracha utilizada é manufaturada pela empresa Garro Indústria Mecânica Ltda, cujo código de identificação é GR 742, e que tem sua principal utilização em suspensões na indústria automobilística. Para a realização do estudo, amostras da bucha de borracha, ilustrada na Figura 25, com as dimensões apresentadas na Tabela 3 foram utilizadas.

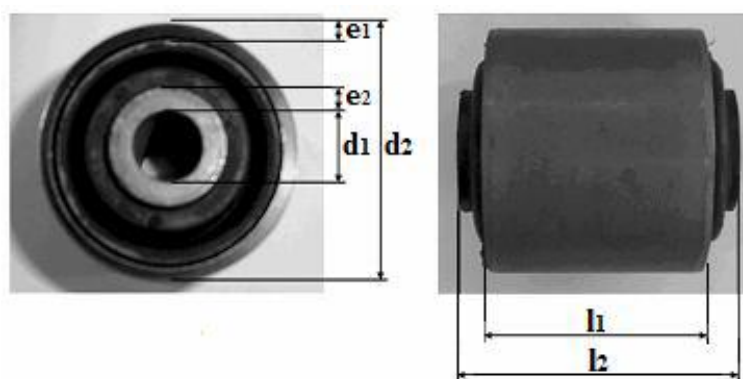


Figura 25 - Bucha de borracha.

Tabela 3 - Dimensões da bucha de borracha.

| Item | Dimensões (mm) |
|---------------------------------------|----------------|
| Diâmetro interno (d_1) | 10 |
| Diâmetro externo (d_2) | 34 |
| Espessura da luva interna (e_2) | 4 |
| Espessura da luva externa (e_1) | 2 |
| Comprimento da luva interna (l_2) | 40 |
| Comprimento da luva externa (l_1) | 28 |

As buchas de borracha são fabricadas por moldagem com injeção do material elastomérico entre as luvas interna e externa de metal. O material elastomérico cura e adere às luvas de metal durante o processo de vulcanização. A bucha é então estampada, isto é, a luva externa metálica é radialmente comprimida. A compressão radial é realizada para eliminar as tensões de tração induzida pelo encolhimento do elastômero durante o processo de cura e melhorar a durabilidade. As luvas interna e externa são feitas em aço e o elastômero, é uma borracha natural preenchida com negro de fumo, com dureza de 59,30 shore A.

3.2 INSTALAÇÕES EXPERIMENTAIS

Os ensaios foram realizados no laboratório de ensaios destrutivos e não destrutivos do Instituto de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Itajubá e a temperatura ambiente foi mantida em 23 ± 2 °C para realização de todos os ensaios reportados neste trabalho. Uma máquina servo-hidráulica INSTRON 8874, apresentada na Figura 26, equipada com controlador digital 8800, software console, células de carga Dynacell™, e um software para testes dinâmicos WaveMatrix™, foi utilizada para realização dos ensaios. As especificações da máquina servo-hidráulica INSTRON 8874 são apresentadas na Tabela 4. Dispositivos foram projetados para realização dos ensaios, de modo que uma haste era fixada a luva interna da bucha e a luva externa era mantida fixa, ver detalhe Figura 26.

Tabela 4 - Especificações da máquina utilizada para realização dos ensaios.

| Item | INSTRON 8874 |
|---------------------------|----------------|
| Capacidade de força axial | 25 kN |
| Capacidade de torque | 100 N.m |
| Faixa de frequência | 0 a 100 Hz |
| Curso axial do atuador | ± 50 mm |
| Rotação do atuador | ± 50 graus |



Figura 26 - Máquina servo-hidráulica INSTRON 8874.

3.3 SISTEMA DE COORDENADAS UTILIZADO

Segundo Adkins et al (1954) e Busfield et al (2001) as aplicações da bucha de borracha envolvem o deslocamento das duas luvas de aço, uma em relação à outra, muitas vezes de uma forma assimétrica. A Figura 27 mostra que no total, há seis movimentos independentes possíveis entre a luva de aço interna e externa. Sendo três deles de translação e definidos como, axial, normal e radial e três de rotação definidos como, torcional e dois como cônico.

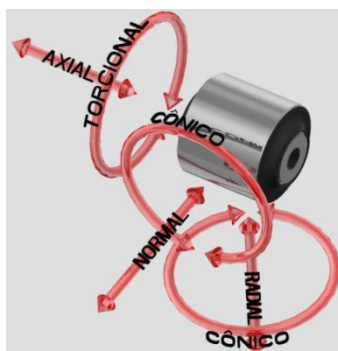


Figura 27 - Sistema de coordenadas utilizado neste trabalho.

No entanto, sob uma avaliação mais detalhada, é visto que dois dos movimentos de translação e dois dos movimentos rotacionais são idênticos devido à simetria da geometria da bucha. Portanto, há apenas quatro modos diferentes de deformação para a bucha, como apresentado na Figura 28, estes modos de deformação são definidos como de torção, axial, radial, e cônico. Assim, quatro modos principais de deformação podem ser distinguidos, e podem ser produzidos pela fixação da luva externa, enquanto a luva interna sofre um dos seguintes deslocamentos:

1. Uma rotação sobre seu eixo, o que chamaremos de deformação de torção;
2. Um deslocamento em que cada ponto move-se paralelamente ao eixo central, o que chamaremos de deformação axial;
3. Um deslocamento em que cada ponto se move por distâncias igualmente espaçadas; perpendicular a um plano contendo o eixo central, o que chamaremos de deformação radial / normal;
4. Uma rotação do eixo num plano radial, sobre um ponto a meia distância das extremidades do material elatômérico, o que chamaremos de deformação cônica.

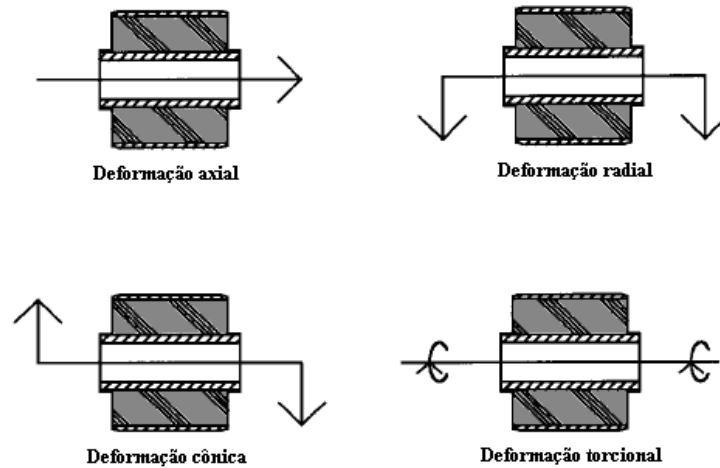


Figura 28 - Diagrama esquemático definindo os quatro modos de deformação padrão.

3.4 CONDICIONAMENTO MECÂNICO DAS BUCHAS DE BORRACHA PARA REALIZAÇÃO DOS ENSAIOS

O material utilizado na fabricação das buchas é um elastômero, borracha natural preenchida com negro de fumo. Segundo Kadlowec et al (2003) quando a bucha é solicitada mecanicamente ocorre uma quebra dos laços fracos entre as moléculas da borracha e partículas de enchimento e entre as moléculas da borracha nas ligações cruzadas. O grau de ruptura no elastômero é mais significativo durante os primeiros exercícios da bucha, e depois se estabiliza. Isso faz com que a resposta das cargas subsequentes na bucha de borracha seja mais suave do que as dos primeiros ciclos, conforme apresentado na Figura 29.

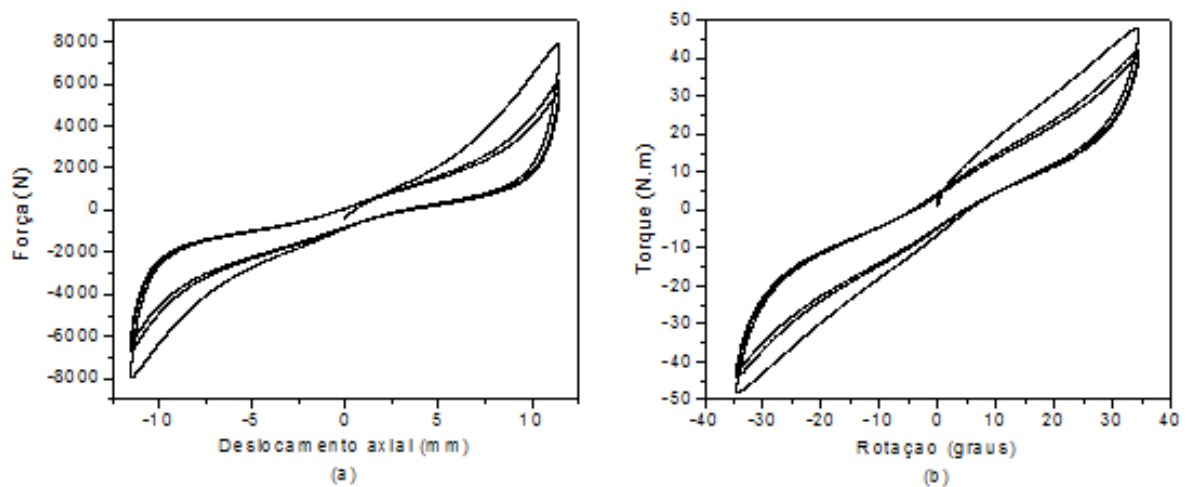


Figura 29 – Condicionamento mecânico, em (a) para o modo de deformação axial e em (b) para o modo de deformação torcional.

Este fenômeno de mudança de comportamento do material devido à deformação prévia é conhecido como efeito Mullins (Mullins, 1969). Na prática, uma bucha não é carregada somente uma vez, assim obter dados durante o primeiro ciclo de carregamento não seria capturar uma resposta de trabalho da bucha. A fim de evitar a estrutura instável do material imediatamente após a produção ou após longos períodos de descanso, o corpo de prova foi submetido a ciclos de carga antes do ensaio. Este procedimento é conhecido como condicionamento mecânico.

O condicionamento mecânico das buchas para realização dos ensaios seguiu um procedimento típico utilizado na literatura (Kadlowec et al, 2009). Um deslocamento axial/radial prévio foi aplicado a uma taxa de 0,0833 mm / s para os ensaios axiais/radiais, e um ângulo de rotação foi aplicado a uma taxa de 1° / s para os ensaios de torção. O condicionamento mecânico consistiu em três ciclos a uma amplitude de 115 % da amplitude de deslocamento do teste a ser realizado. Após o condicionamento mecânico, os efeitos materiais foram considerados os mesmos para cada teste, ou seja, evitou-se a mudança no comportamento do material nos primeiros ciclos de carga devido ao efeito Mullins.

3.5 METODOLOGIA EXPERIMENTAL

3.5.1 Ensaio Estáticos

Segundo Dozdrov (1996) para um material ser considerado viscoelástico, dentre algumas características, é necessário que o mesmo experimente o fenômeno de relaxação de tensão. Esse fenômeno está associado à combinação dos efeitos elásticos e viscosos. Buchas de borracha quando solicitadas por cargas estáticas mostram características de relaxamento de tensão.

Para o estudo do comportamento mecânico da bucha de borracha quando submetida a carregamentos estáticos, foram realizados ensaios para os modos de deformação axial, radial, torcional, e por fim para o modo de deformação axial- torcional acoplado.

3.5.1.1 Ensaio estático para o modo de deformação axial

Os ensaios estáticos para o modo de deformação axial foram realizados conforme o gráfico mostrado na Figura 30. Um deslocamento axial foi imposto à bucha de borracha a uma taxa de deformação pré-determinada, que corresponde ao intervalo de tempo entre t_0 e t_1 . Esse deslocamento foi mantido constante por 120 s, sendo o relaxamento da força axial registrado neste período, que corresponde ao intervalo de tempo entre t_1 e t_2 . Após os 120 s, ou seja, no tempo t_2 , o deslocamento foi devolvido à zero em 10 s, tempo que corresponde ao intervalo entre t_2 e t_3 , e deixou-se relaxar a bucha de borracha por 120 s, tempo que corresponde ao intervalo entre t_3 e t_4 . Os ensaios foram realizados com diversos deslocamentos e tempos para se atingir os deslocamentos (taxas de deformação) diferentes, como mostrados na Tabela 5. Neste trabalho o tempo levado para se atingir o deslocamento axial imposto no ensaio será chamado de tempo de subida.

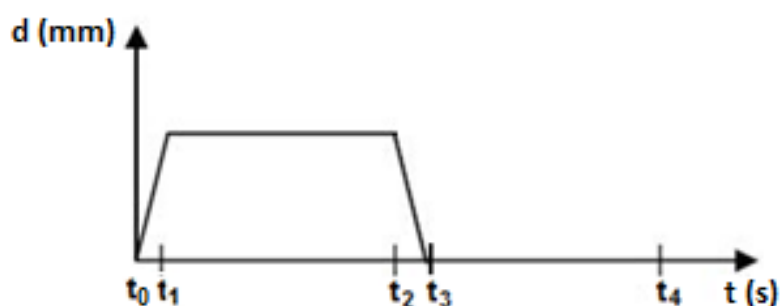


Figura 30 - Rampa para realização dos ensaios estáticos para o modo de deformação axial.

Tabela 5 - Deslocamentos e tempos de subida dos ensaios estáticos para o modo de deformação axial.

| Item | Axial |
|---------------------|---|
| Tempo de subida (s) | 0,10 – 0,25 – 0,50 – 1,00 – 2,00 – 4,00 – 8,00 |
| Deslocamento (mm) | 1,00- 2,00 - 3,00 - 4,00 – 5,00 – 6,00 – 7,00 – 8,00 – 9,00 - 10,00 |

3.5.1.2 Ensaio estático para o modo de deformação torcional

Os ensaios estáticos para o modo de deformação torcional foram realizados conforme o gráfico mostrado na Figura 31. Uma rotação foi aplicada na bucha de borracha a uma taxa de deformação pré-determinada, que corresponde ao intervalo de tempo entre t_0 e t_1 . Esta rotação foi mantida constante por 120 s, sendo o relaxamento do torque registrado neste período, que

corresponde ao intervalo de tempo entre t_1 e t_2 . Após os 120 s, ou seja, no tempo t_2 , a rotação foi devolvida a zero grau em 10 s, tempo que corresponde ao intervalo entre t_2 e t_3 , e deixou-se relaxar a bucha de borracha por 120 s, tempo que corresponde ao intervalo entre t_3 e t_4 . Os ensaios foram realizados com diversas rotações e tempos para se atingir as rotações (taxas de deformações) diferentes, como mostrado na Tabela 6. Neste trabalho o tempo levado para se atingir à rotação imposta no ensaio será chamado de tempo de giro.

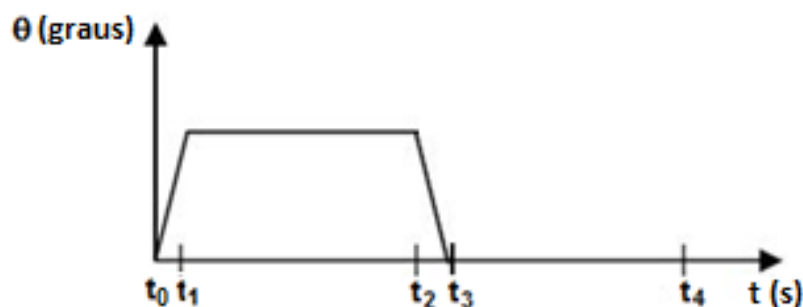


Figura 31 - Rampa para realização dos ensaios estáticos para o modo de deformação torcional.

Tabela 6 - Deslocamentos e tempos de giro dos ensaios estáticos para o modo de deformação torcional.

| Item | Torcional |
|-------------------|---|
| Tempo de giro (s) | 0,10 – 0,25 – 0,50 – 1,00 – 2,00 – 4,00 – 8,00 |
| Rotação (graus) | 1,00 – 5,00 – 10,00 – 15,00 – 20,00 – 25,00 – 30,00 |

3.5.1.3 Ensaios estáticos para o modo de deformação radial

Os ensaios estáticos para o modo de deformação radial foram realizados conforme o gráfico mostrado na Figura 32. Um deslocamento radial foi aplicado na bucha de borracha a uma taxa de deformação pré-determinada, que corresponde ao intervalo de tempo entre t_0 e t_1 . Esse deslocamento foi mantido constante por 120 s, sendo o relaxamento da força radial registrado neste período, que corresponde ao intervalo de tempo entre t_1 e t_2 . Após os 120 s, ou seja, no tempo t_2 , o deslocamento foi devolvido à zero em 10 s, tempo que corresponde ao intervalo entre t_2 e t_3 , e deixou-se relaxar a bucha de borracha por 120 s, tempo que corresponde ao intervalo entre t_3 e t_4 . Os ensaios foram realizados com diversos deslocamentos radiais e tempos para se atingir os deslocamentos (taxas de deformação) diferentes, como mostrado na Tabela 7. Neste trabalho o tempo levado para se atingir o deslocamento radial imposto no ensaio será chamado de tempo de subida.

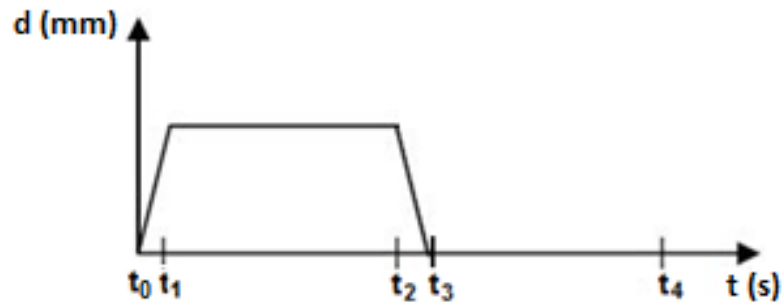


Figura 32 - Rampa de realização dos ensaios estáticos para o modo de deformação radial.

Tabela 7 - Deslocamentos e tempos de subida dos ensaios estáticos para o modo de deformação radial.

| Item | Radial |
|---------------------|--|
| Tempo de subida (s) | 0,10 – 0,25 – 0,50 – 1,00 – 2,00 – 4,00 – 8,00 |
| Deslocamento (mm) | 0,25 – 0,50 – 1,00- 1,50 – 2,00 |

3.5.1.3 Ensaios estáticos para o modo de deformação axial-torcional acoplado

Ensaios estáticos para o modo de deformação axial-torcional acoplado foram realizados na bucha de borracha estudada. Os testes foram feitos de modo que ângulos de rotações e deslocamentos axiais eram aplicados à bucha por meio de uma haste fixada a luva interna sendo que a luva externa era mantida fixa. As forças, deslocamentos, torques e ângulos de giros foram registrados pelos transdutores da máquina.

Os ensaios estáticos para o modo de deformação axial-torcional acoplado foram realizados conforme gráfico apresentado na Figura 33. Uma rampa de rotação foi imposta a luva interna da bucha de borracha, a uma velocidade de 1 grau/s, que corresponde ao intervalo de tempo entre t_0 e t_1 , deixando-se relaxar a bucha por 600 s, tempo que corresponde ao intervalo entre t_1 e t_2 , após esses 600 s, ou seja, no tempo t_2 uma rampa de deslocamento axial foi aplicada a uma velocidade de 500 mm/min, intervalo de tempo entre t_2 e t_3 e a bucha foi autorizada a relaxar por 600 s, tempo que corresponde ao intervalo entre t_3 e t_4 . A resposta em torque e força no sentido axial da bucha foram registradas neste segundo equilíbrio para comparações posteriores. Ambos os deslocamentos de torção e axial foram devolvidos a zero em t_4 , a uma velocidade de 500 mm/min, intervalo de tempo entre t_4 e t_5 e permitiu-se relaxar a bucha de borracha por 600 s, tempo que corresponde ao intervalo entre t_5 e t_6 . Este processo

foi repetido por várias combinações de rotações (0° , 5° , 10° , 15° , 20° , 25° e 30°) e deslocamentos axiais (0,00 a 10,00 mm, com um incremento de 1,00 mm).

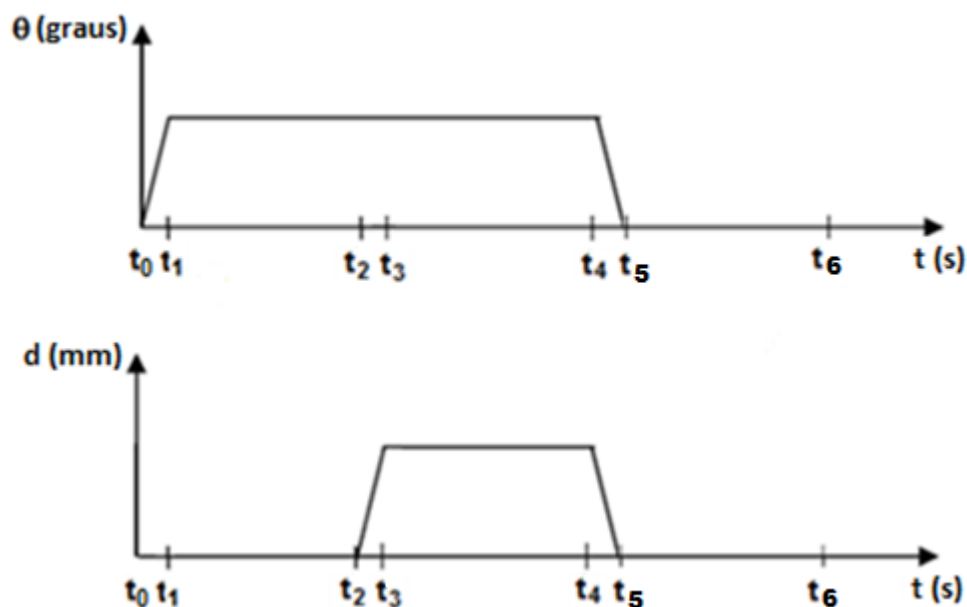


Figura 33. Rampa de deslocamento utilizada para realização dos ensaios estáticos axial-torcional acoplado.

3.5.2 Ensaio Dinâmicos

O Propósito dos ensaios dinâmicos realizados é observar as características de rigidez e amortecimento da bucha de borracha em função dos deslocamentos e frequências, ou seja, verificar a dependência do comportamento mecânico em função das amplitudes de deslocamento e taxas de deformação diferentes.

Uma vez que segundo Ok et al (2007-b) a frequência numa bucha de borracha medida numa estrada áspera, para análise da durabilidade a um campo de testes, em geral exibe um valor de pico na faixa de 10 ~ 15 Hz, adotou-se um valor de frequência máxima de 20 Hz para a realização dos ensaios dinâmicos.

Para o estudo do comportamento mecânico da bucha de borracha sujeito a carregamentos dinâmicos, foram realizados ensaios para o modo de deformação axial, modo de deformação torcional, modo de deformação radial, e por fim para o modo de deformação axial-torcional acoplado.

3.5.2.1 Ensaios dinâmicos para o modo de deformação axial

Os ensaios dinâmicos para o modo de deformação axial foram realizados utilizando 8 deslocamentos e 8 frequências diferentes. Os ensaios foram divididos em duas séries de ensaios. Na primeira série foram utilizados menores deslocamentos e frequências maiores, já para a segunda série de ensaios utilizou-se de maiores deslocamentos e frequência menores. Os valores dos deslocamentos e frequências ensaiados são apresentados na Tabela 8. Foram realizados 10 ciclos com cada combinação de deslocamento e frequência para as séries. As respostas em força em função do deslocamento axial foram registradas pelos transdutores da máquina.

Tabela 8 – Deslocamentos e frequências para os ensaios dinâmicos para o modo de deformação axial.

| Item | Primeira série | Segunda série |
|-------------------|--------------------------|----------------------------|
| Frequência (Hz) | 5 – 10 – 15 - 20 | 1 – 2 – 3 - 4 |
| Deslocamento (mm) | 0,50 – 1,00 – 1,50 -2,00 | 2,50 – 5,00 – 7,50 – 10,00 |

3.5.2.2 Ensaios dinâmicos para o modo de deformação torcional

Os ensaios dinâmicos para o modo de deformação torcional foram realizados utilizando 8 rotações e 8 frequências diferentes. Os ensaios foram divididos em duas séries de ensaios. Na primeira série foram utilizadas rotações menores e frequências maiores, já para a segunda série de ensaios utilizou-se de rotações maiores e frequências menores. Os valores das rotações e frequências ensaiadas são apresentados na Tabela 9. Foram realizados 10 ciclos com cada combinação de rotação e frequência. As respostas em torque em função da rotação foram registradas pelos transdutores da máquina.

Tabela 9 – Rotações e frequências para os ensaios dinâmicos para o modo de deformação torcional.

| Item | Primeira série | Segunda série |
|------------------|---------------------------|------------------------------|
| Frequência (Hz) | 5 – 6 – 7 - 8 | 1 – 2 – 3 - 4 |
| Rotações (graus) | 5,00 – 6,00 – 7,00 – 8,00 | 5,00 – 10,00 – 20,00 – 30,00 |

3.5.2.3 Ensaios dinâmicos para o modo de deformação radial

Os ensaios dinâmicos para o modo de deformação radial foram realizados utilizando 8 deslocamentos radiais e 8 frequências diferentes. Os ensaios foram divididos em duas séries de ensaios. Na primeira série foram utilizados menores deslocamentos e frequências maiores, já para a segunda série de ensaios utilizou-se de maiores deslocamentos e frequência menores. Os valores dos deslocamentos e frequências ensaiados são apresentados na Tabela 10. Foram realizados 10 ciclos com cada combinação de deslocamento e frequência. As respostas em força em função do deslocamento radial foram registradas pelos transdutores da máquina.

Tabela 10 – Deslocamentos e frequências para os ensaios dinâmicos para o modo de deformação radial.

| Item | Primeira série | Segunda série |
|-------------------|---------------------------|---------------------------|
| Frequência (Hz) | 5 – 10 – 15 - 20 | 1 – 2 – 3 - 4 |
| Deslocamento (mm) | 0,05 - 0,10 - 0,15 - 0,20 | 0,25 – 0,50 – 1,00 – 2,00 |

3.5.2.4 Ensaios dinâmicos para o modo de deformação axial-torcional acoplado

Buchas de borracha são geralmente solicitadas por cargas estáticas (tais como o peso do veículo, passageiros e bagagens) sobre a qual são sobrepostas cargas cíclicas (tais como a vibração produzida pelo motor ou devido às vibrações transmitidas a partir das superfícies das vias de tráfego). Partindo deste fato foram realizados ensaios de forma que uma carga dinâmica fosse sobreposta a uma carga estática. Para realização deste estudo escolheu-se o modo de deformação axial para ser solicitado por uma carga estática e o modo de deformação torcional para ser solicitado por uma carga dinâmica.

Os ensaios consistiram em modos acoplados de deformação axial-torcional. Os testes foram feitos de modo que deslocamentos axiais e ângulos de rotações eram aplicados à bucha por meio de uma haste fixada a luva interna e a luva externa era mantida fixa. As forças, deslocamentos, torques e ângulos de giros foram registrados pelos transdutores da máquina.

Os ensaios dinâmicos para o modo de deformação axial-torcional acoplado foram realizados conforme o gráfico apresentado na Figura 34. Um deslocamento axial foi imposto à

luva interna da bucha de borracha a uma velocidade de 500 mm/min, que corresponde ao intervalo de tempo entre t_0 e t_1 . Esse deslocamento foi mantido constante, deixando-se relaxar a bucha por 600 s, tempo que corresponde ao intervalo entre t_1 e t_2 . Após esses 600 s, ou seja, no tempo t_2 uma solicitação dinâmica de rotação foi aplicada durante o intervalo entre t_2 e t_3 igual a 10 ciclos. As respostas em força axial e torque da bucha foram registradas neste intervalo entre t_2 e t_3 , para comparações posteriores. Ambas as solicitações, axial e de torção foram devolvidas a zero em t_3 e permitiu-se relaxar durante um intervalo de tempo entre t_3 e t_4 igual a 600 s. Este processo foi repetido por várias combinações de deslocamentos (0,00 a 10,00 mm, com um incremento de 1,00 mm) e rotações (5° , 10° , 15° , 20° , 25° e 30°). Para cada etapa, o deslocamento axial foi atingido em uma velocidade de 500 mm/min e a solicitação dinâmica de rotação foi imposta a 4 Hz para o ângulo de rotação de 5° , 2 Hz para o ângulo de rotação de 10° , 1 Hz para o ângulo de rotação de 20° e 0,75 Hz para o ângulo de 30° , de forma a se ter a mesma taxa de deformação na realização das solicitações dinâmicas.

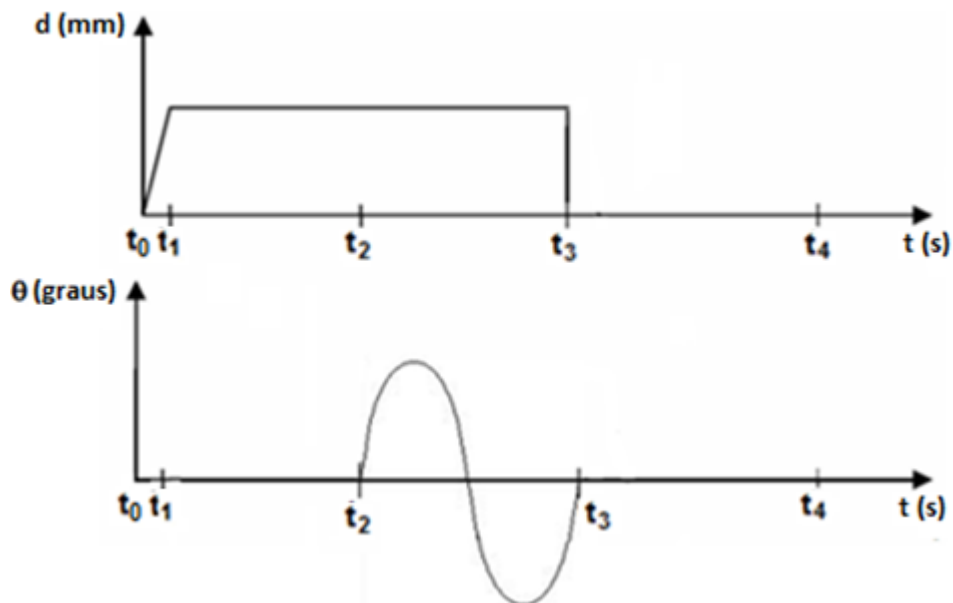


Figura 34. Rampa de solicitações utilizada para realização dos ensaios dinâmicos axial-torcional.

Capítulo 4

RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 RESULTADOS DOS ENSAIOS ESTÁTICOS

Vários fenômenos interessantes foram observados a partir dos dados da resposta em força axial, radial e torque referente aos ensaios estáticos para os modos de deformação axial, torcional, radial e axial- torcional acoplado realizados neste trabalho, esses fenômenos são apresentados e discutidos no decorrer deste capítulo.

Os resultados dos ensaios estáticos são aqui apresentados na forma de gráficos, com o objetivo de avaliar o comportamento mecânico de buchas de borracha, para os modos de deformação axial, torcional, radial e axial- torcional acoplado, quando submetidas a diferentes amplitudes e taxas de deformação, e também avaliar os efeitos do tempo nas respostas a estas solicitações.

4.1.1 Resultados dos Ensaios Estáticos para o Modo de Deformação Axial

Iniciando a apresentação dos resultados dos ensaios estáticos para o modo de deformação axial, é plotado na Figura 35, uma curva característica da resposta em força em

função do deslocamento axial, para uma bucha de borracha solicitada até a ruptura, onde se utilizou para realização do ensaio uma velocidade de deslocamento de 500 mm/min, velocidade esta indicada pela norma ASTM D412 (2008), para determinação da resistência a tração de borrachas vulcanizadas e elastômeros termoplásticos. Esse ensaio foi importante, dentre alguns outros fatores, como as próprias condições de uso da bucha de borracha, para a determinação dos limites dos deslocamentos para os ensaios realizados para o modo de deformação axial.

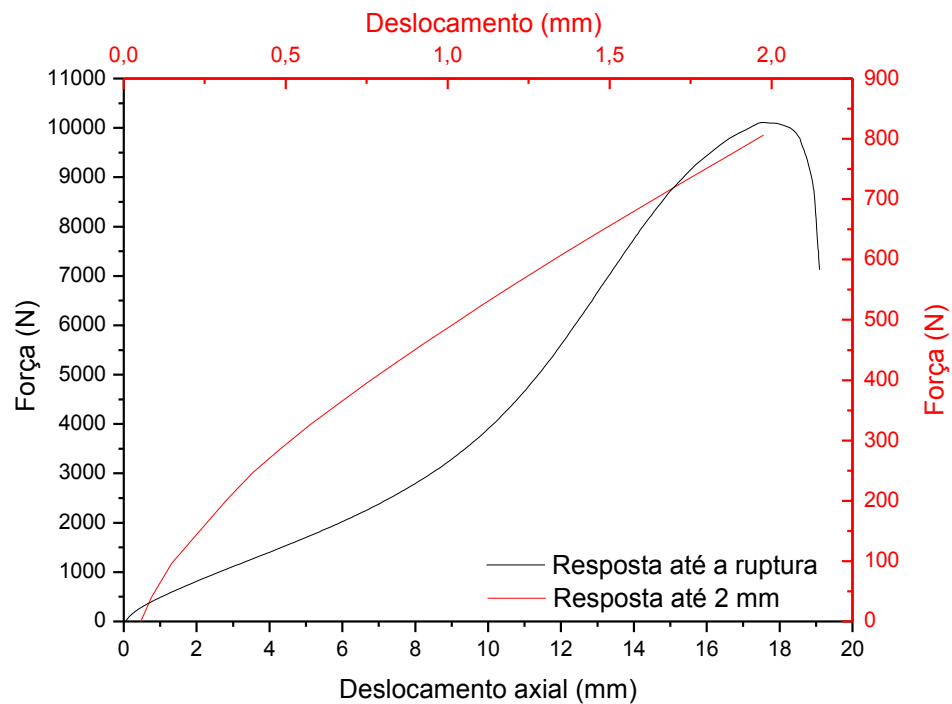


Figura 35 – Resposta em força em função do deslocamento axial para uma bucha de borracha solicitada até a ruptura

A curva característica da resposta em força em função do deslocamento axial para a bucha de borracha até a ruptura mostra-se não linear, que é uma característica da borracha natural vulcanizada com cargas de negro de fumo utilizada na fabricação da bucha.

Observa-se por meio da curva apresentada que inicialmente com o aumento do deslocamento há uma diminuição da rigidez na resposta em força em função do deslocamento (ver resposta até 2,00 mm). Isso pode ser atribuído a interações entre o material de enchimento e a borracha (Gent, 2001). Continuando a análise da curva observa-se que a rigidez aumenta quando o deslocamento aumenta ainda mais. Isso é atribuído a extensibilidade finita das cadeias da borracha (Gent, 2001).

Ao acompanhar o ensaio observou-se que ao se atingir um deslocamento axial maior que 10 mm, a borracha começa a se desprender da luva externa. A bucha começa a apresentar sinais de fratura quando se aumenta ainda mais esse deslocamento, já ao se atingir um deslocamento próximo de 18 mm a resposta em força começa a cair. Para um deslocamento próximo de 19 mm, já se tem a ruptura total da bucha de borracha. As buchas ensaiadas mostraram como força máxima um valor pouco superior a 10000 N.

Precedendo a realização dos ensaios estáticos para o modo de deformação axial, foi realizado o condicionamento mecânico das amostras. Na Figura 36 é apresentada a curva para a força em função do deslocamento do condicionamento mecânico para o deslocamento axial máximo utilizado neste trabalho, que é de 10,00 mm, onde foram realizados 3 ciclos a 115% desse deslocamento, a uma taxa de deformação de 0,0833 mm/min.

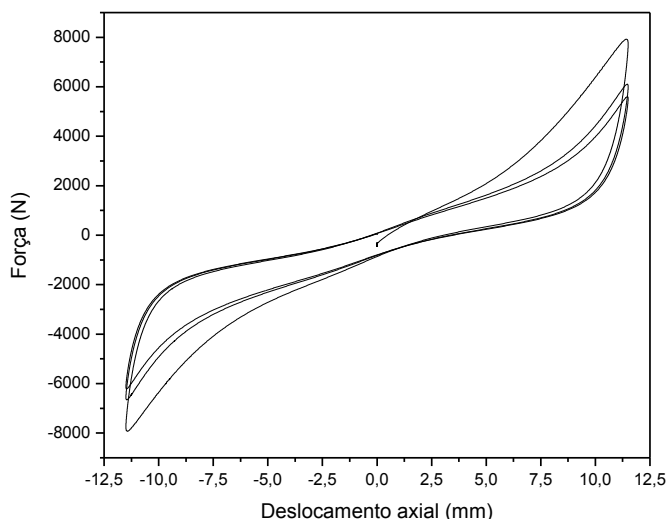


Figura 36 – Condicionamento mecânico para o modo de deformação axial

Na realização dos ensaios descritos no item 3.5.1.1 “Ensaio estático para o modo de deformação axial”, observou-se que para cada deslocamento imposto a rampa de ensaios, obteve-se uma resposta em força, esta resposta apresentou uma força de pico, que ocorreu ao fim de cada deslocamento, sendo dependente da taxa de deformação. A força então diminuiu para um equilíbrio durante o período em que o deslocamento permaneceu constante. Segundo Lee et al (1999 – a) esta é uma resposta típica de materiais viscoelásticos e foi observada nos resultados dos ensaios realizados neste trabalho. Esta viscoelasticidade não pode ser desprezada porque é um mecanismo de dissipação de energia, sendo assim é importante analisar os seus efeitos no estudo do comportamento mecânico de buchas de borracha.

A Figura 37 apresenta a resposta em força em função do deslocamento para uma bucha de borracha sob solicitações axiais. Um deslocamento axial foi imposto a uma taxa constante até que um deslocamento final de 1,00 mm para (a) e 2,00 mm para (b) fosse alcançado. Para cada ensaio na série, a taxa de deformação foi diminuída (isto é, o tempo de subida aumentado), e assim o deslocamento final na série foi alcançado em tempos crescentes e mantido constante por 120 s. Os tempos de subida empregados foram 0,10 s, 0,25 s, 0,50 s, 1,00 s, 2,00 s, 4,00 s, 8,00 s.

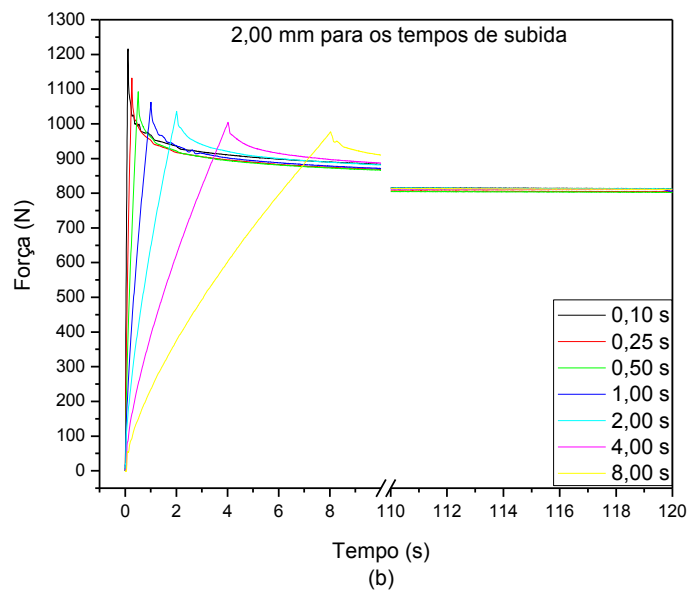
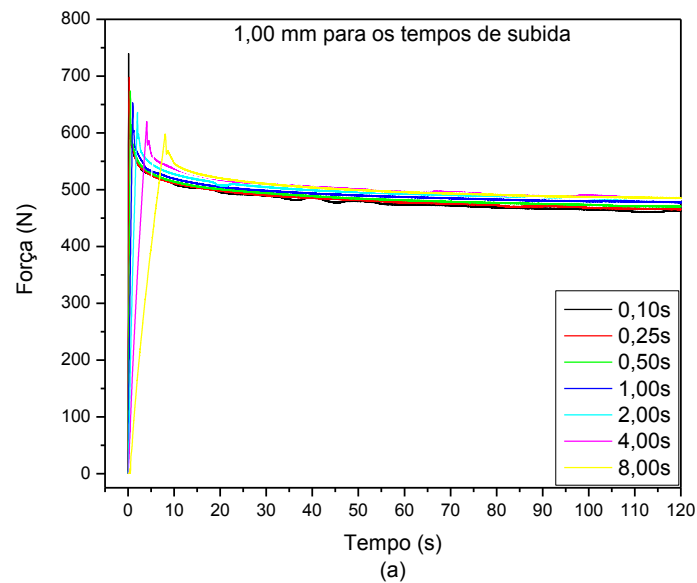


Figura 37 – Em (a) forças axiais em função do deslocamento de 1,00 mm para os tempos de subida e em (b) forças axiais em função do deslocamento de 2,00 mm para os tempos de subida.

Observa-se nos gráficos que as características da força axial na bucha mostram uma tendência linear em relação ao tempo de subida para esses pequenos deslocamentos. Verifica-se ainda que para cada deslocamento imposto a rampa de ensaios obteve-se uma resposta em força, esta resposta apresentou uma força de pico, que ocorreu ao fim de cada deslocamento, sendo que esta força aumenta à medida que o tempo de subida diminui, ou seja, aumenta com o aumento da taxa de deformação. Além disso, parece se aproximar de um valor limite quando o tempo de subida tender a zero. Resultados similares foram encontrados por OK et al (2007 - b).

Segundo Kadlovec et al (2003) esse aumento da força axial com a diminuição do tempo de subida (aumento da taxa de deformação) para as buchas de borracha acontece porque as longas cadeias moleculares da borracha precisam de tempo para escoar uma em relação a outra. Emaranhamentos podem ocorrer entre e ao longo das cadeias moleculares. Se a bucha de borracha é deformada, a uma taxa mais rápida do que as cadeias podem deslizar umas sobre as outras, o material se comporta como se as cadeias fossem mais curtas, isto é, o material tem uma resposta mais rígida.

A Figura 38 apresenta as respostas das forças axiais da bucha de borracha referentes aos deslocamentos de 5,00 mm em (a) e 6,00 mm em (b) para os tempos de subida. Observa-se nos gráficos que quando se impõe um deslocamento na bucha de borracha e esse deslocamento é mantido constante, ocorre um relaxamento do material, com diminuição da resposta em força axial. Nota-se que ocorre uma quantidade significativa de relaxamento, sendo que para um tempo de 60 s a resposta em força axial já permanece praticamente constante. Observa-se também que a quantidade de relaxamento é maior para tempos de subida menores e menor para tempos de subida maiores.

Nota-se também por meio dos gráficos apresentados, que a força após o relaxamento é independente dos tempos de subida. Os picos de força, força após o relaxamento e o tempo de relaxamento são dados importantes para o estudo do comportamento mecânico da bucha de borracha.

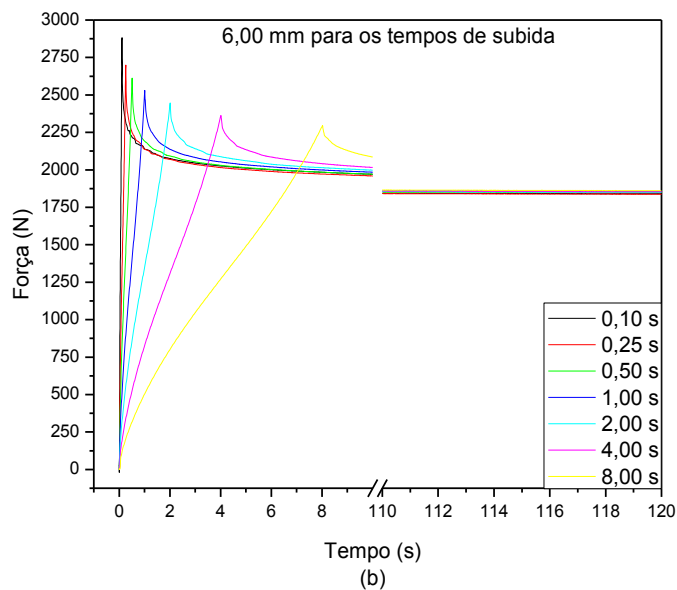
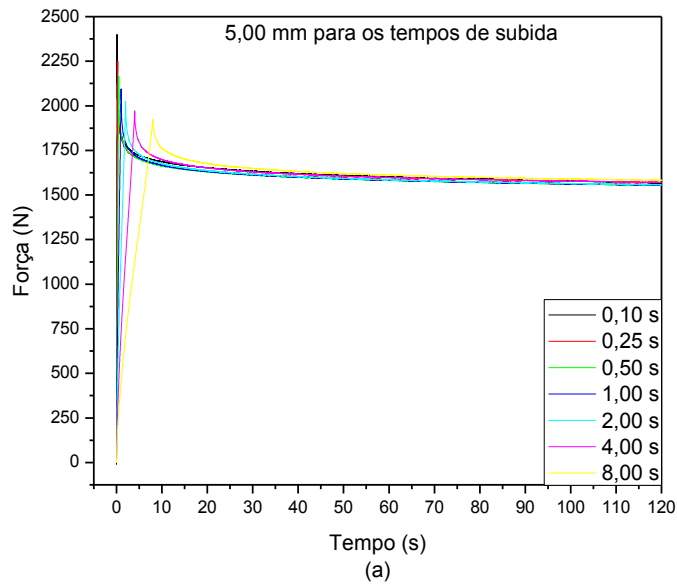


Figura 38 – Em (a) forças axiais em função do deslocamento de 5,00 mm para os tempos de subida e em (b) forças axiais em função do deslocamento de 6,00 mm para os tempos de subida.

A Figura 39 apresenta as respostas das forças axiais da bucha de borracha referentes aos deslocamentos de 9,00 mm em (a) e 10,00 mm em (b) para os tempos de subida. Verifica-se por meio dos gráficos que as características da força axial na bucha mostram uma tendência não linear para maiores deslocamentos e tempos de subida maiores. Os gráficos mostram também que a força axial na bucha de borracha apresenta ainda características lineares para maiores deslocamentos quando os tempos de subida são menores.

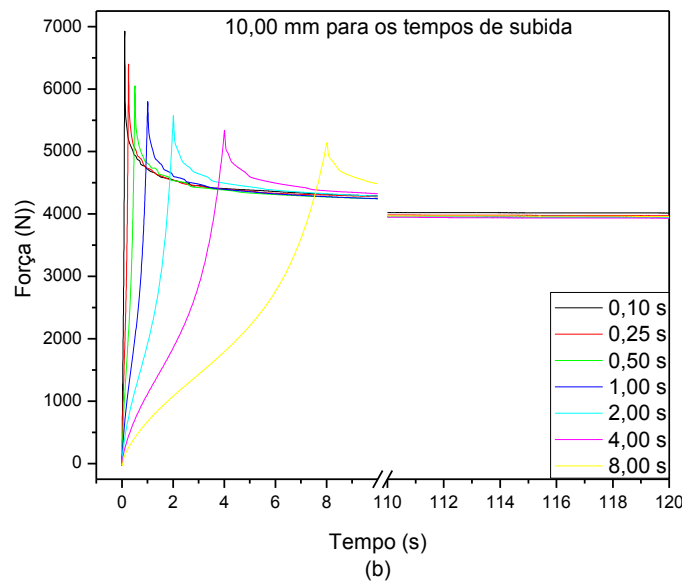
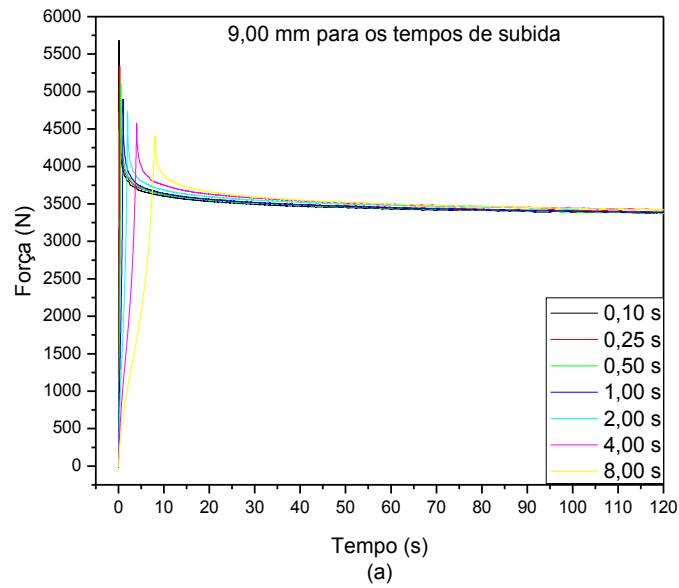


Figura 39 – Em (a) forças axiais em função do deslocamento de 9,00 mm para os tempos de subida e em (b) forças axiais em função do deslocamento de 10,00 mm para os tempos de subida.

As forças axiais após o relaxamento para os deslocamentos de 1,00 mm a 10,00 mm são apresentadas na Figura 40. A curva da resposta em força em função do deslocamento é não linear, sendo esse comportamento típico de materiais como a borracha. Segundo Kadlovec et al (2003) a diminuição na rigidez observada em deslocamentos até aproximadamente 6,00 mm é devido à interação entre a borracha e seu material de enchimento. Em deslocamentos

maiores que 6,00 mm observa-se o aumento da rigidez, devido à extensibilidade finita das cadeias poliméricas.

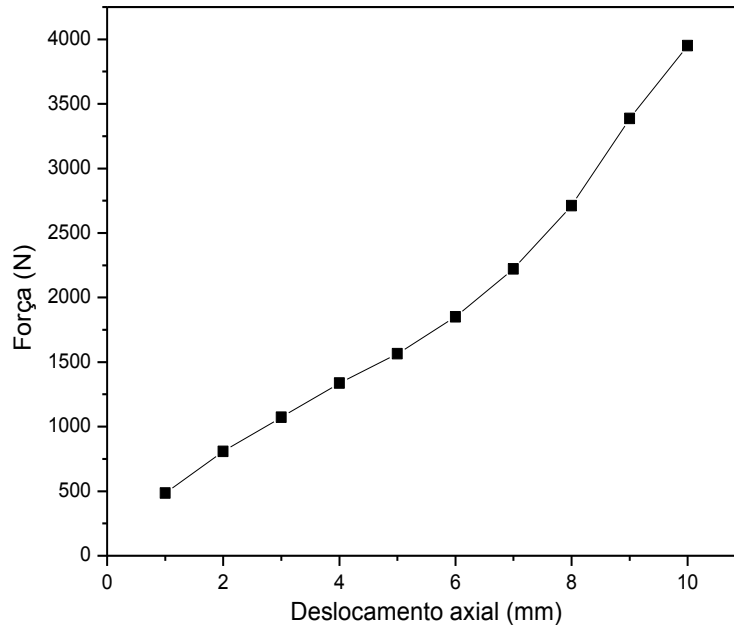


Figura 40 – Forças axiais em função dos deslocamentos após o relaxamento.

4.1.2 Resultados dos Ensaio Estáticos para o Modo de Deformação Torcional

Inicia-se a apresentação dos resultados dos ensaios estáticos para o modo de deformação torcional apresentando na Figura 41, um gráfico da resposta em torque em função da rotação, para a bucha de borracha solicitada até a ruptura, onde se utilizou para realização do ensaio uma taxa de deformação de 1 grau/s. Esse ensaio foi importante, dentre alguns outros fatores, como as próprias condições de uso da bucha de borracha, para a determinação dos limites de rotação para os ensaios a serem realizados para o modo de deformação torcional.

A curva característica da resposta em torque em função da rotação para a bucha de borracha solicitada até a ruptura mostra-se não linear, que é uma característica da borracha natural vulcanizada com cargas de negro de fumo utilizada na fabricação da bucha.

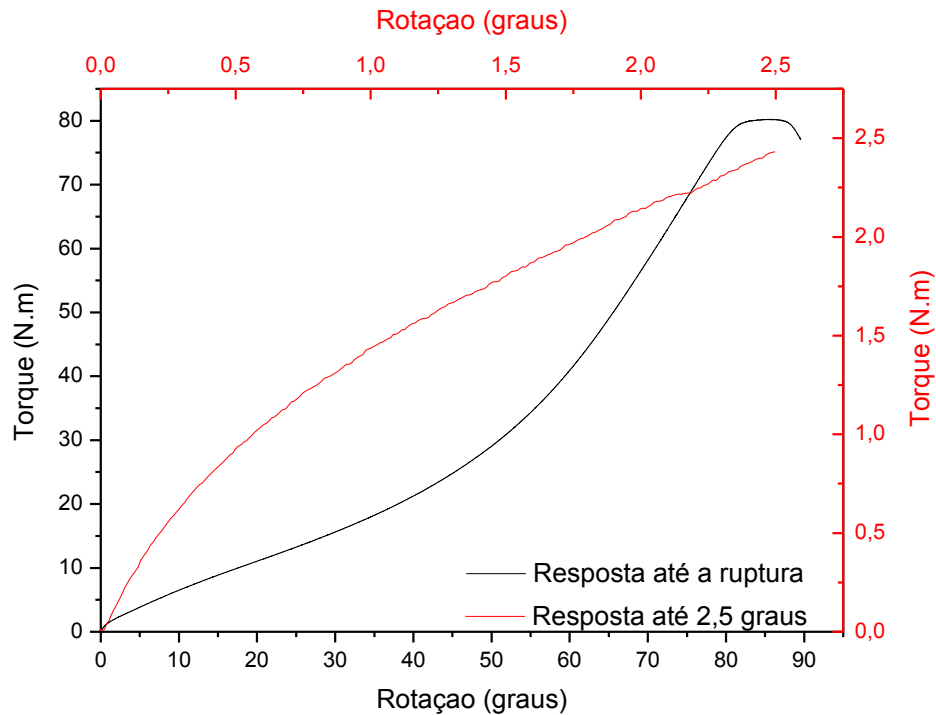


Figura 41 – Resposta do torque em função da rotação para a bucha de borracha solicitada até a ruptura.

Observa-se também que o comportamento da curva característica da resposta em torque em função da rotação, para a bucha solicitada até a ruptura mostra-se similar ao comportamento da curva característica para a resposta em força em função de um deslocamento axial para a bucha de borracha solicitada até a ruptura, (Figura 35). Inicialmente foi observada uma diminuição da rigidez com o aumento da rotação (ver resposta até 2,5 graus), seguido de um aumento da rigidez quando a rotação aumenta ainda mais.

No ensaio para o modo de deformação torcional até a ruptura as buchas ensaiadas mostraram como torque máximo um valor pouco superior a 80 N.m.

Precedendo a realização dos ensaios estáticos para o modo de deformação torcional foi realizado o condicionamento mecânico das amostras. Na Figura 42 é apresentada a curva de torque em função da rotação do condicionamento mecânico para a rotação máxima utilizada neste trabalho, que é de 30 graus, onde foram realizados 3 ciclos a 115% desta rotação, a uma taxa de deformação de 1 grau/min.

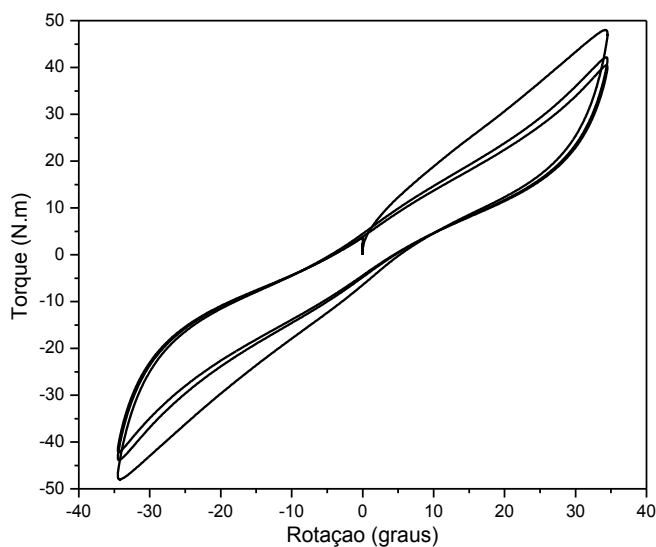


Figura 42 – Condicionamento mecânico para o modo de deformação torcional

Na realização dos ensaios descritos no item 3.5.1.2 “Ensaio estático para o modo de deformação torcional”, observou-se que a resposta em torque tem características similares à resposta em força axial observada nos ensaios estáticos realizados para o modo de deformação axial. Para cada ângulo de rotação imposto a rampa de ensaios obteve-se uma resposta em torque, esta resposta apresentou um torque de pico, que ocorreu ao fim de cada ângulo de rotação. O torque então diminuiu para um equilíbrio durante o período em que a rotação permaneceu constante. O torque de pico, torque após o relaxamento e tempos de relaxamento são dados importantes para o estudo do comportamento mecânico da bucha de borracha.

A Figura 43 apresenta a resposta em torque em função da rotação para uma bucha de borracha sob solicitações torcionais. Uma rotação foi imposta a uma taxa constante até que uma rotação final de 1 grau para (a) e 5 graus para (b) fosse alcançada. Para cada ensaio na série, a taxa de deformação foi diminuída (isto é, o tempo de giro aumentado), e assim a rotação final na série foi alcançada em tempos crescentes e mantida constante por 120 s. Os tempos de giro empregados foram 0,10 s, 0,25 s, 0,50 s, 1,00 s, 2,00 s, 4,00 s, 8,00 s.

Observa-se nos gráficos que as características da resposta em torque na bucha apresentam uma tendência linear em relação ao tempo de giro para estas pequenas rotações. Verifica-se ainda que para cada rotação imposta à rampa de ensaios obteve-se uma resposta em torque, esta resposta apresentou um torque de pico, que ocorreu ao fim de cada

deslocamento, sendo que esse torque aumenta à medida que o tempo de giro diminui, ou seja, com o aumento da taxa de deformação. Além disso, parece se aproximar de um valor limite quando o tempo de giro tender a zero. Resultados similares foram encontrados por Lee et al (1999 - b).

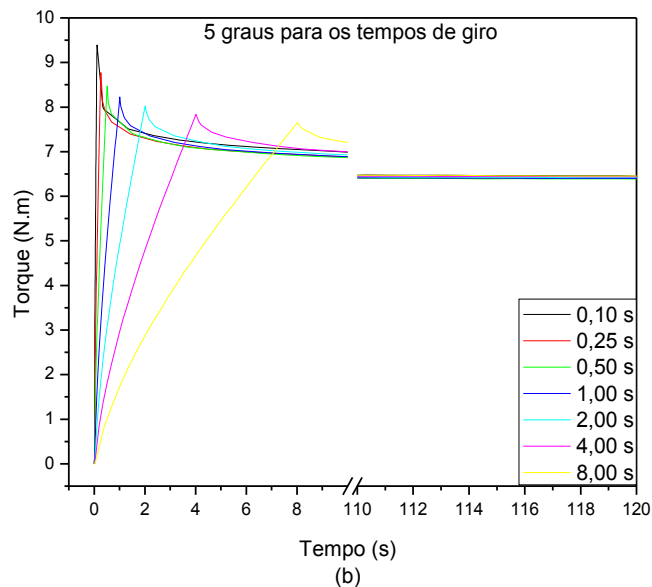
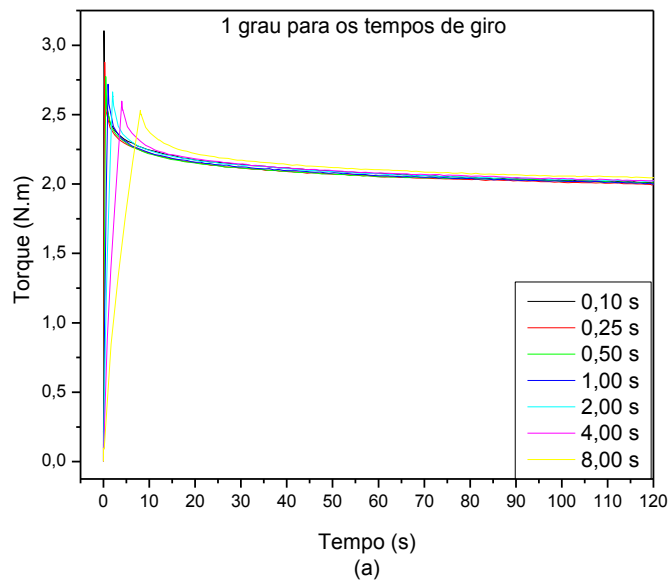


Figura 43 – Em (a) torque em função da rotação de 1 grau para os tempos de giro e em (b) torque em função da rotação de 5 graus para os tempos de giro.

A Figura 44 apresenta as respostas do torque da bucha de borracha referentes às rotações de 10 graus em (a) e 15 graus em (b) para os tempos de giro. Os gráficos mostram que quando se impõe um ângulo de rotação na bucha de borracha e esse ângulo de rotação é

mantido constante ocorre um relaxamento do material com diminuição do torque. Nota-se que ocorre uma quantidade significativa de relaxamento, sendo que para um tempo de 60 s a resposta em torque já permanece praticamente constante. Observa-se também que a quantidade de relaxamento do torque é maior para tempos de giro menores e menor para tempos de giro maiores.

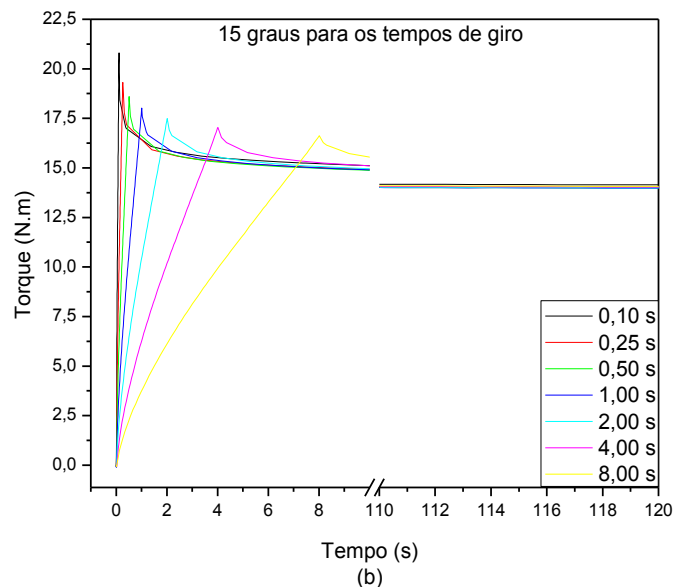
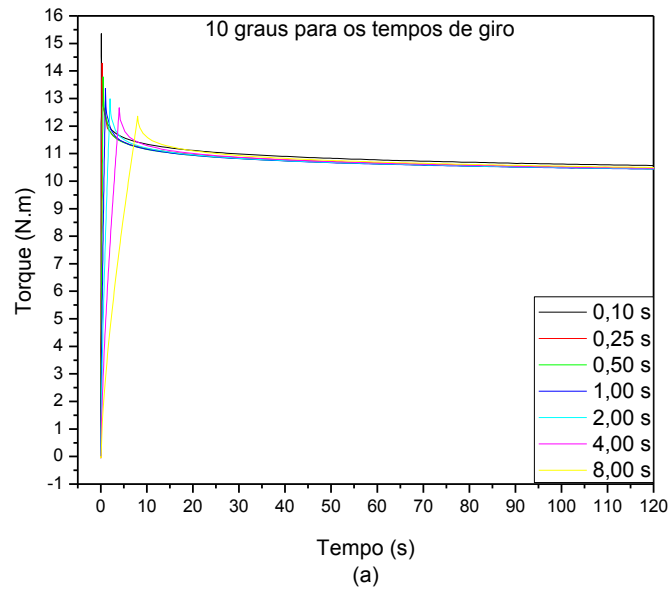


Figura 44 – Em (a) torque em função da rotação de 10 graus para os tempos de giro e em (b) torque em função da rotação de 15 graus para os tempos de giro.

A Figura 45 apresenta as respostas do torque da bucha de borracha referentes às rotações de 20 graus em (a) e 30 graus em (b) para os tempos de giro. Os gráficos mostram

que os torques são maiores para ângulos de rotações maiores. Observa-se também que a resposta em torque é linear para o tempo de subida de 0,10 s mesmo para deformações maiores, já para o tempo de giro de 8,00 s a resposta é não linear. Observa-se que o torque de pico aumenta à medida que o tempo de giro diminui e parece se aproximar de um valor limite quando o tempo de giro tender a zero. Nota-se também por meio dos gráficos apresentados que o torque após o relaxamento é independente do tempo de giro.

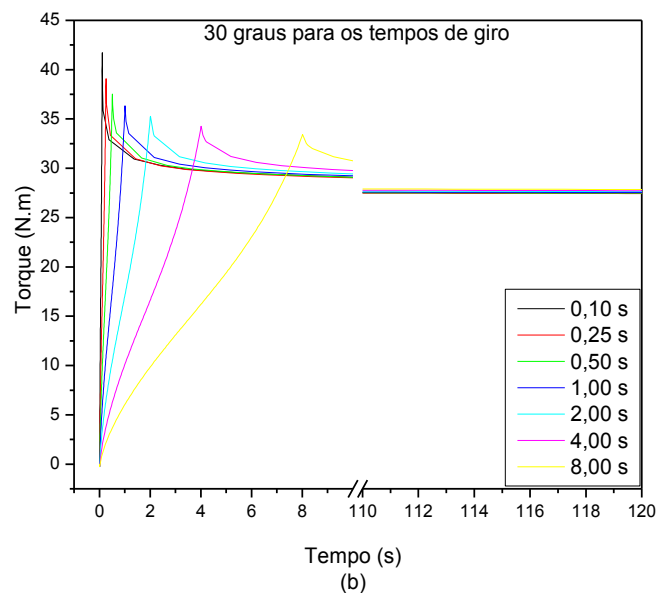
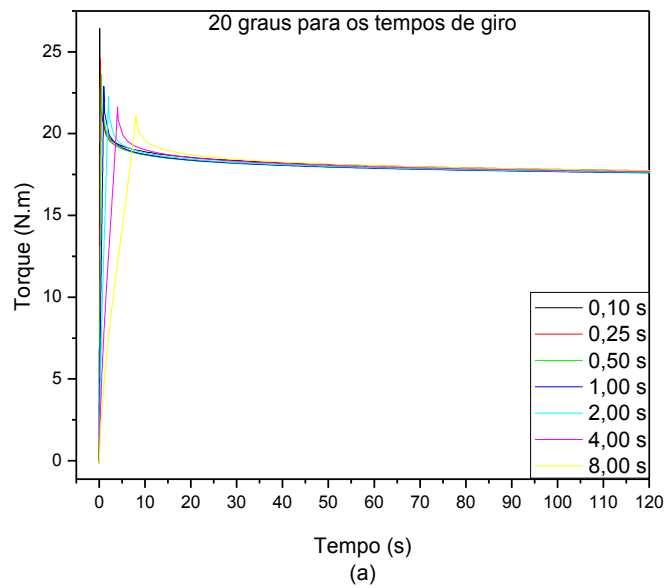


Figura 45 – Em (a) torque em função da rotação de 20 graus para os tempos de giro e em (b) torque em função da rotação de 30 graus para os tempos de giro.

Verifica-se por meio dos gráficos apresentados que as características do torque na bucha mostram uma tendência não linear para maiores ângulos de rotação e tempos de giro maiores. Os gráficos mostram também que o torque na bucha de borracha apresenta ainda características lineares para maiores ângulos de rotação quando os tempos de giro são menores.

A curva característica da resposta em torque após o relaxamento para as rotações de 1 grau a 30 graus é apresentada na Figura 46, a curva apresenta um comportamento não linear, inicialmente com o aumento da rotação é observada uma diminuição da rigidez, devido à interação entre o material de enchimento e a borracha, e posteriormente um aumento da rigidez, quando a rotação aumenta ainda mais, devido à extensibilidade finita das cadeias poliméricas. Resultados similares foram encontrados por Kadlovec et al (2003).

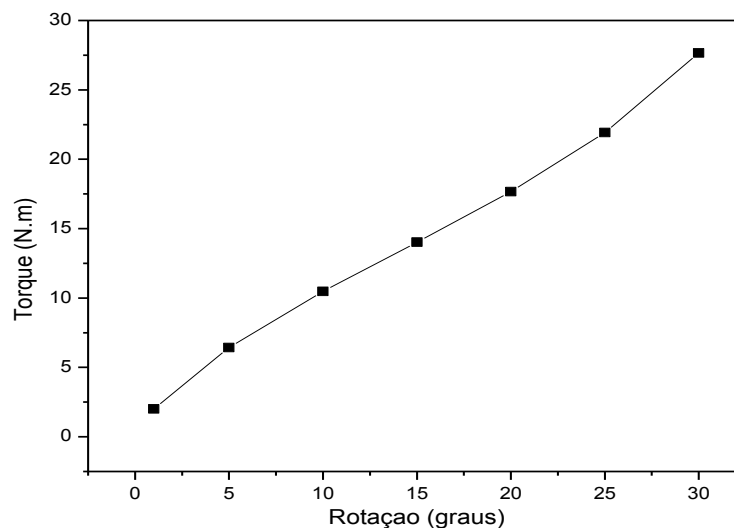


Figura 46 – Torques em função das rotações após o relaxamento.

4.1.3 Resultados dos Ensaio Estáticos para o Modo de Deformação Radial

Os resultados dos ensaios estáticos para o modo de deformação radial inicia-se apresentando na Figura 47 um gráfico da resposta em força em função do deslocamento radial para uma bucha de borracha solicitada até 3,00 mm, onde se utilizou para realização do ensaio uma velocidade de deslocamento de 500 mm/min.

O deslocamento de 3,00 mm foi utilizado pois por limitações de carga na máquina não era possível realizar uma sollicitação radial até uma possível falha da bucha. Optou-se então em limitar esse ensaio em um deslocamento de 3,00 mm ou uma força de 25 kN, o que ocorresse primeiro. Esse ensaio foi importante, dentre alguns outros fatores como as próprias condições de uso da bucha de borracha e dados da literatura, para determinação dos limites dos deslocamentos nos ensaios realizados para o modo de deformação radial.

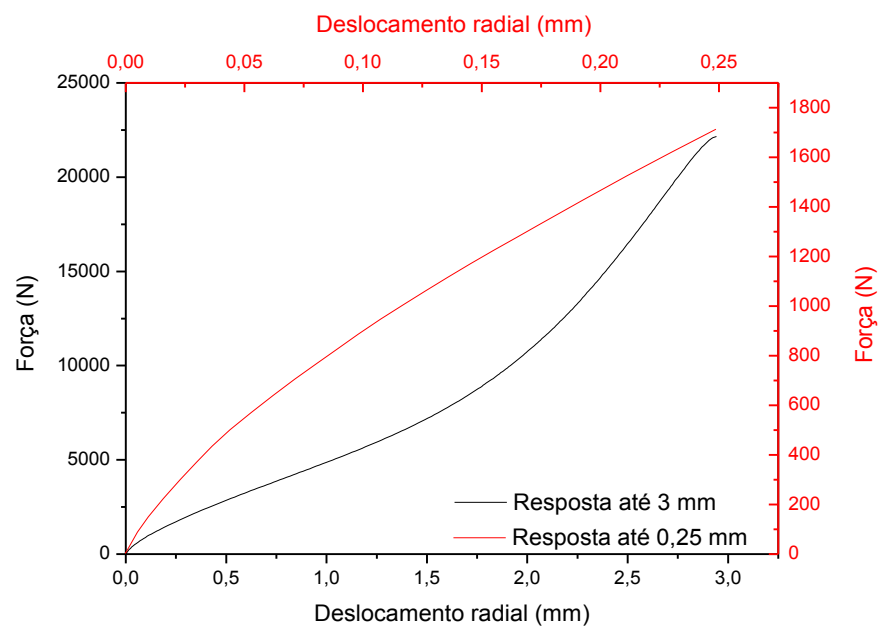


Figura 47 – Resposta em força em função do deslocamento radial para uma bucha de borracha sollicitada até 3,00 mm.

A resposta em força em função do deslocamento radial para a bucha de borracha sollicitada até 3,00 mm mostra-se não linear, que é uma característica da borracha natural vulcanizada com cargas de negro de fumo utilizada na fabricação da bucha. No ensaio para o modo de deformação radial até 3,00 mm as buchas ensaiadas mostraram como força máxima uma força pouco superior a 22.000 N.

Observa-se também que o comportamento da curva característica da resposta em força em função do deslocamento radial, para a bucha sollicitada até 3,00 mm mostra-se similar ao comportamento da curva característica para a resposta em força em função do deslocamento axial para a bucha de borracha sollicitada até a ruptura, (Figura 35). Inicialmente foi observada uma diminuição da rigidez com o aumento do deslocamento radial (ver resposta até 0,25 mm), seguido de um aumento da rigidez quando o deslocamento aumenta ainda mais.

Precedendo a realização dos ensaios estáticos para o modo de deformação radial foi realizado o condicionamento mecânico das amostras, na Figura 48 é apresentada a curva força em função do deslocamento do condicionamento mecânico para o deslocamento radial máximo utilizado neste trabalho, que é de 2,00 mm, onde foram realizados 3 ciclos a 115% desse deslocamento a uma taxa de deformação de 0,0833 mm/min.

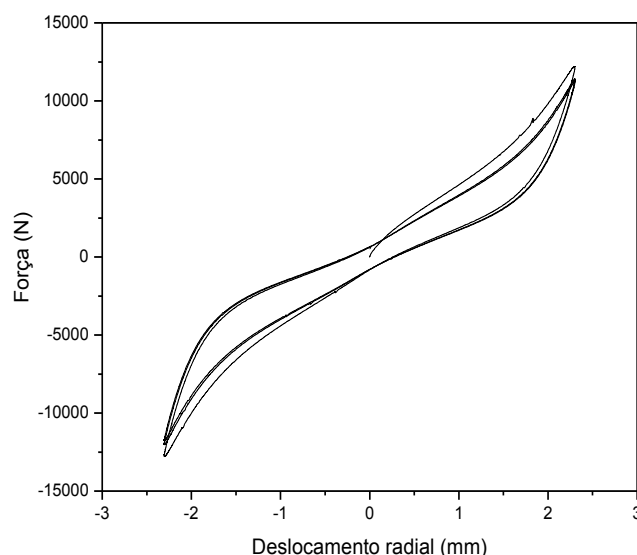


Figura 48 – Condicionamento mecânico para o modo de deformação radial

Na realização dos ensaios descrito no item 3.5.1.3 “Ensaio estático para o modo de deformação radial”, observou-se que as respostas em força radial apresentaram características semelhantes às respostas apresentadas nos ensaios realizados para os modos de deformação axial e torcional, ou seja, para cada deslocamento imposto a rampa de ensaios obteve-se uma resposta em força, esta resposta apresentou uma força de pico, que ocorreu ao fim de cada deslocamento, sendo dependente da taxa de deformação. A força então relaxou para um equilíbrio durante o período em que o deslocamento permaneceu constante.

A Figura 49 apresenta a resposta em força em função do deslocamento para uma bucha de borracha sob solicitações radiais. Um deslocamento radial foi imposto a uma taxa constante até que um deslocamento final de 0,25 mm para (a) e 0,50 mm para (b) fosse alcançado. Para cada ensaio na série, a taxa de deformação foi diminuída (isto é, o tempo de subida aumentado), e assim o deslocamento final na série foi alcançado em tempos crescentes e mantido constante por 120 s. Os tempos de subida empregados foram 0,10 s, 0,25 s, 0,50 s, 1,00 s, 2,00 s, 4,00 s, 8,00 s.

Observa-se nos gráficos que as características da força radial na bucha mostram uma tendência linear em relação ao tempo de subida para estas pequenas deformações. Verifica-se ainda que para cada deslocamento imposto a rampa de ensaios obteve-se uma resposta em força, esta resposta apresentou uma força de pico, que ocorreu ao fim de cada deslocamento, sendo que esta força aumenta à medida que o tempo de subida diminui, ou seja, com o aumento da taxa de deformação e parece se aproximar de um valor limite quando o tempo de subida tender a zero. Resultados similares foram encontrados por Kadlovec et al (2003).

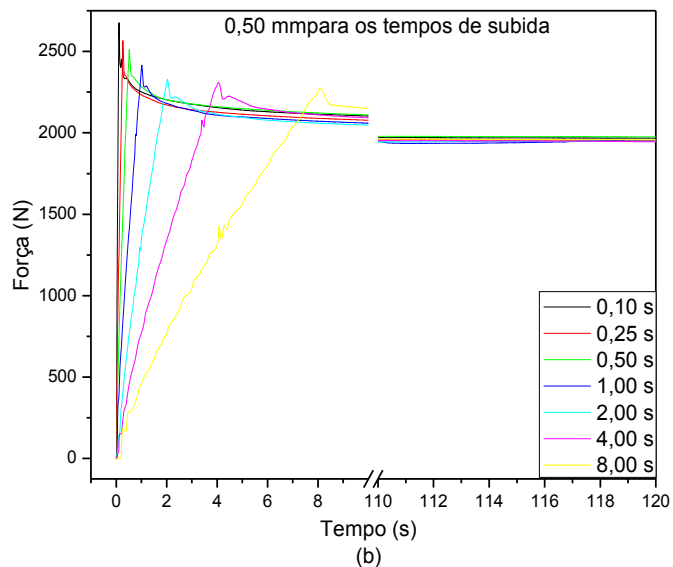
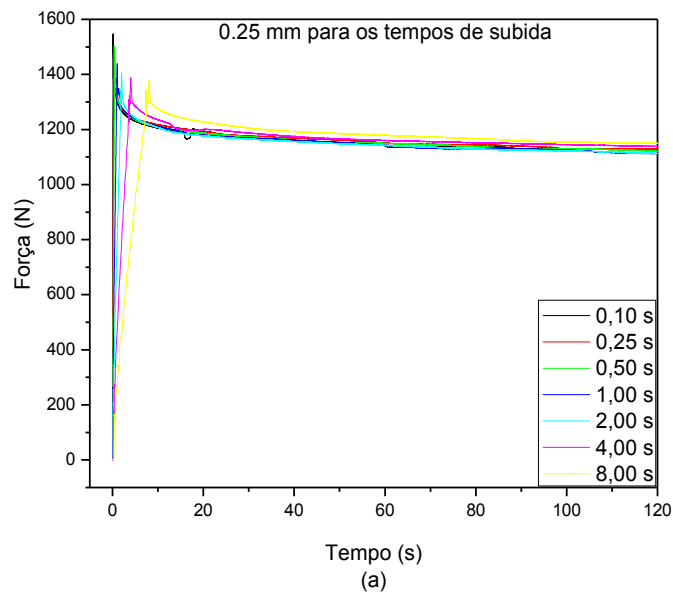


Figura 49 – Em (a) forças radiais em função do deslocamento de 0,25 mm para os tempos de subida e em (b) forças radiais em função do deslocamento de 0,50 mm para os tempos de subida.

A Figura 50 apresenta as respostas das forças radiais da bucha de borracha referentes ao deslocamento de 1,00 mm para os tempos de subida. Respostas semelhantes às apresentadas para o modo de deformação axial e torcional, podem ser observadas, quando se impõe um deslocamento radial na bucha de borracha e esse deslocamento é mantido constante, ocorre um relaxamento da força radial. Nota-se que ocorre uma quantidade significativa de relaxamento da força, sendo que para um tempo de 60 s a resposta em força radial já permanece praticamente constante.

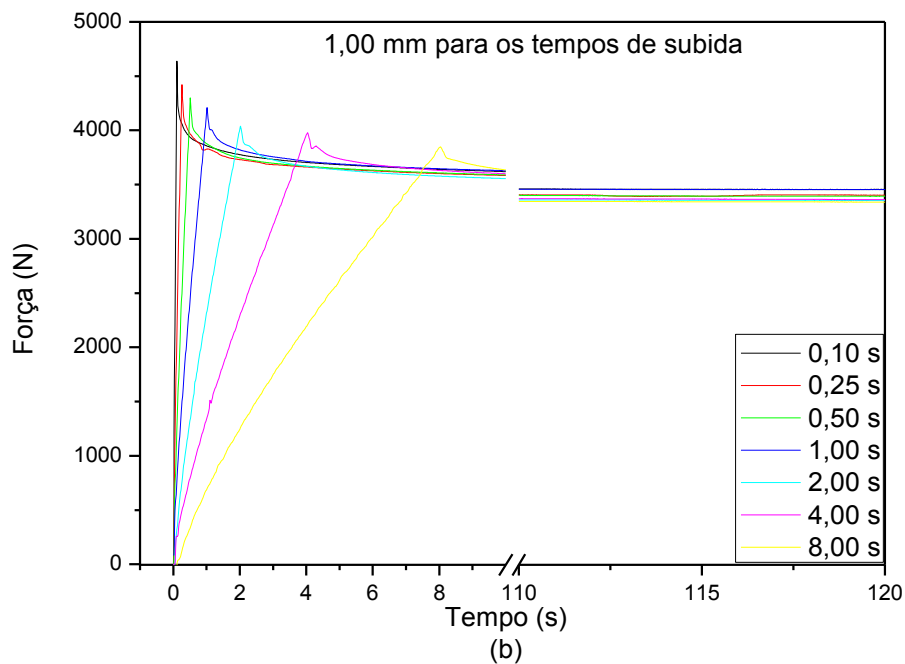


Figura 50 – Forças radiais em função do deslocamento de 1,00 mm para os tempos de subida.

Observa-se também que a quantidade de relaxamento da força radial é maior para tempos de subida menores e menor para tempos de subida maiores. A força radial após o relaxamento também é independente do tempo de subida.

A Figura 51 apresenta as respostas das forças radiais da bucha de borracha referentes aos deslocamentos de 1,50 mm em (a) e 2,00 mm em (b) para os tempos de subida. Observando os gráficos verifica-se que as características da força radial na bucha mostram uma tendência não linear para maiores deformações e tempos de subida maiores. Os gráficos mostram também que a força radial na bucha de borracha apresenta ainda características lineares para maiores deformações quando os tempos de subida são menores.

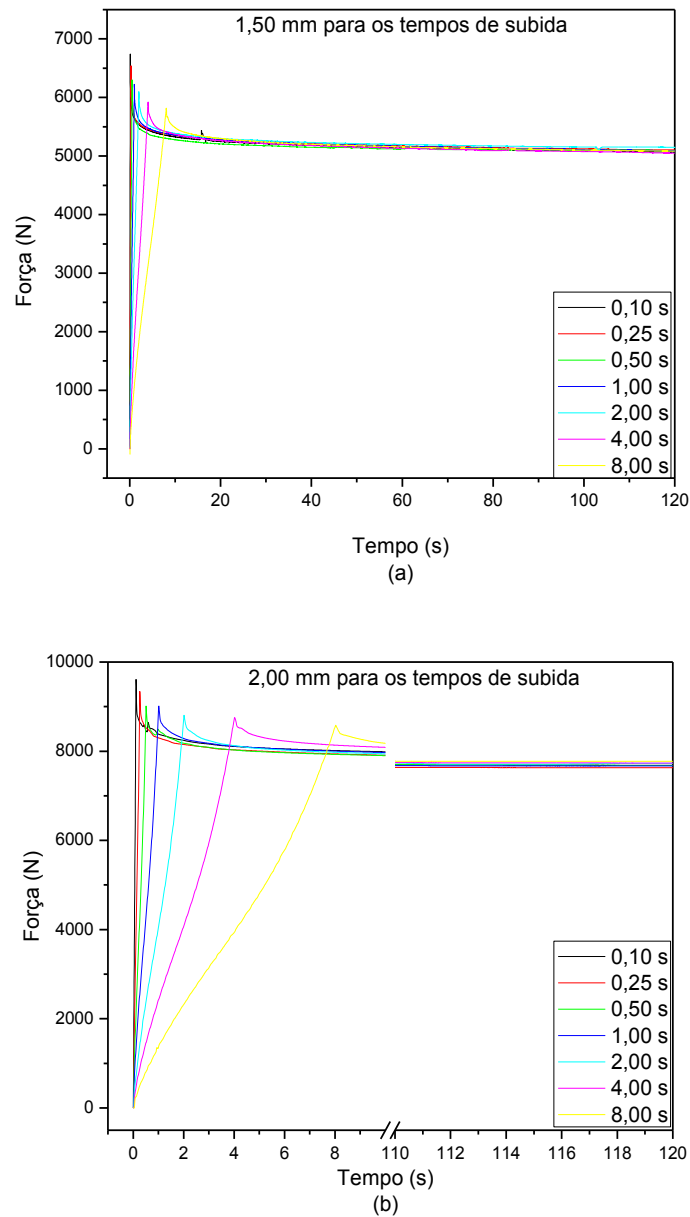


Figura 51 – Em (a) forças radiais em função do deslocamento de 1,50 mm para os tempos de subida e em (b) forças radiais em função do deslocamento de 2,00 mm para os tempos de subida.

As forças radiais após o relaxamento para os deslocamentos de 0,25 mm a 2,00 mm são apresentadas na Figura 52, observa-se que a resposta em força em função do deslocamento é não linear. Observa-se também que as respostas em força para o modo de deformação radial em comparação as respostas apresentadas para o modo de deformação axial para um mesmo deslocamento são maiores. Isso ocorre porque a bucha utilizada neste estudo foi projetada de forma que tem uma rigidez radial de aproximadamente 7 vezes a rigidez axial.

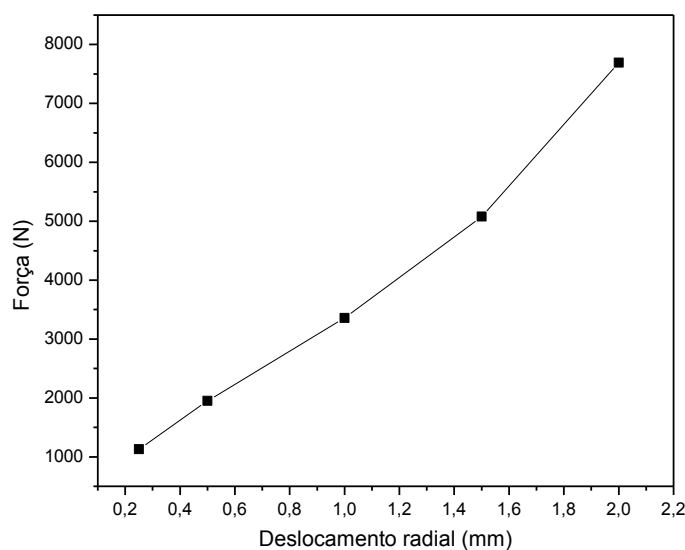


Figura 52 – Forças radiais em função dos deslocamentos após o relaxamento.

4.1.4 Resultados dos Ensaios Estáticos para o Modo de Deformação Axial-Torcional Acoplado

Precedendo a realização dos ensaios estáticos para o modo de deformação axial-torcional acoplado, foi realizado o condicionamento mecânico das amostras, seguindo-se o mesmo procedimento utilizado para o modo de deformação axial e torcional simples.

A partir dos resultados experimentais dos ensaios estáticos para o modo de deformação axial-torcional acoplado, foi possível observar que a resposta em torque em função de uma rotação imposta a bucha de borracha, é significativamente afetada pela quantidade do deslocamento axial acoplado.

A Figura 53 apresenta o gráfico do torque em função dos deslocamentos axiais de 0,00 a 10,00 mm para o ângulo de rotação de 5° em (a), e o gráfico do torque em função dos deslocamentos axiais de 0,00 a 10,00 mm para o ângulo de rotação de 10° em (b). Observa-se por meio dos gráficos que à medida que se aumenta o deslocamento axial, para uma faixa de deslocamentos, a resposta em torque inicialmente diminui até um valor mínimo. Quando esse deslocamento axial é aumentado ainda mais, a resposta em torque aumenta. Resultados similares foram encontrados por Kadlowec et al (2009).

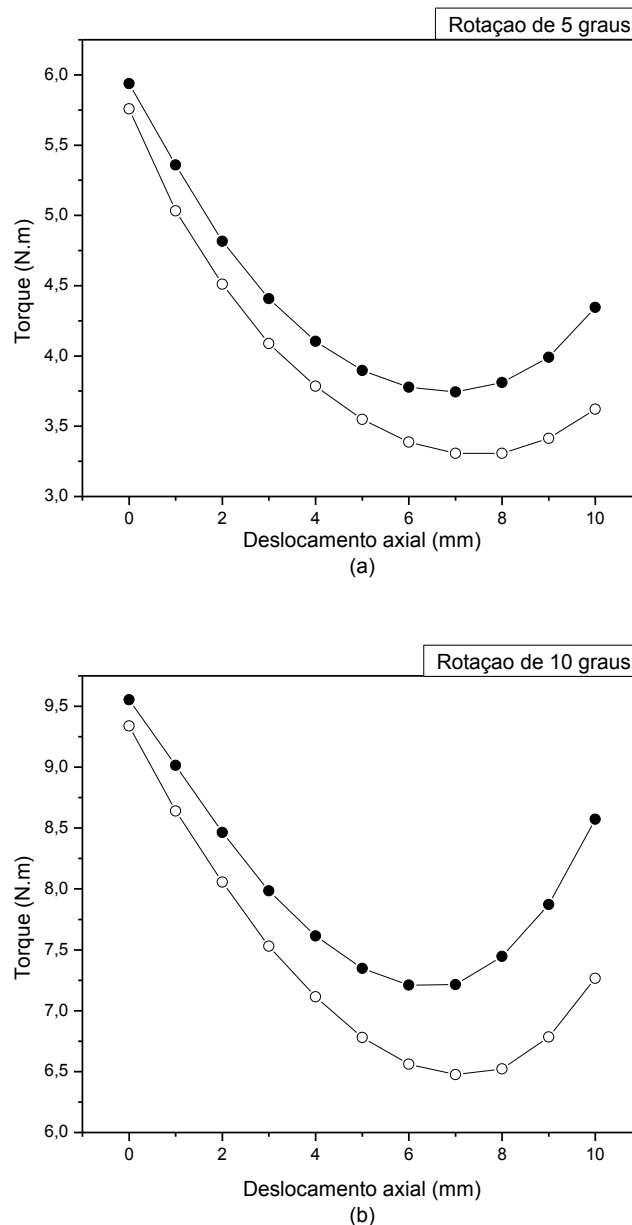


Figura 53 – Em (a) torque para o ângulo de 5° em função do deslocamento axial e em (b) torque para o ângulo de 10° em função do deslocamento axial.

A redução no torque em virtude do aumento do deslocamento axial mostrou-se mais pronunciado para pequenos ângulos de rotação, como visto na Figura 53 em (a) e (b). Já o aumento no torque devido ao deslocamento axial mostrou-se mais pronunciado para maiores ângulos de rotação, o que pode ser observado na Figura 54 em (a) e (b). A diferença entre um ponto e outro para um mesmo deslocamento no gráfico, representado pelo círculo preenchido e pelo círculo vazio, corresponde ao relaxamento do torque registrado nos 600 s, que corresponde ao intervalo entre t_3 e t_4 apresentado na Figura 33.

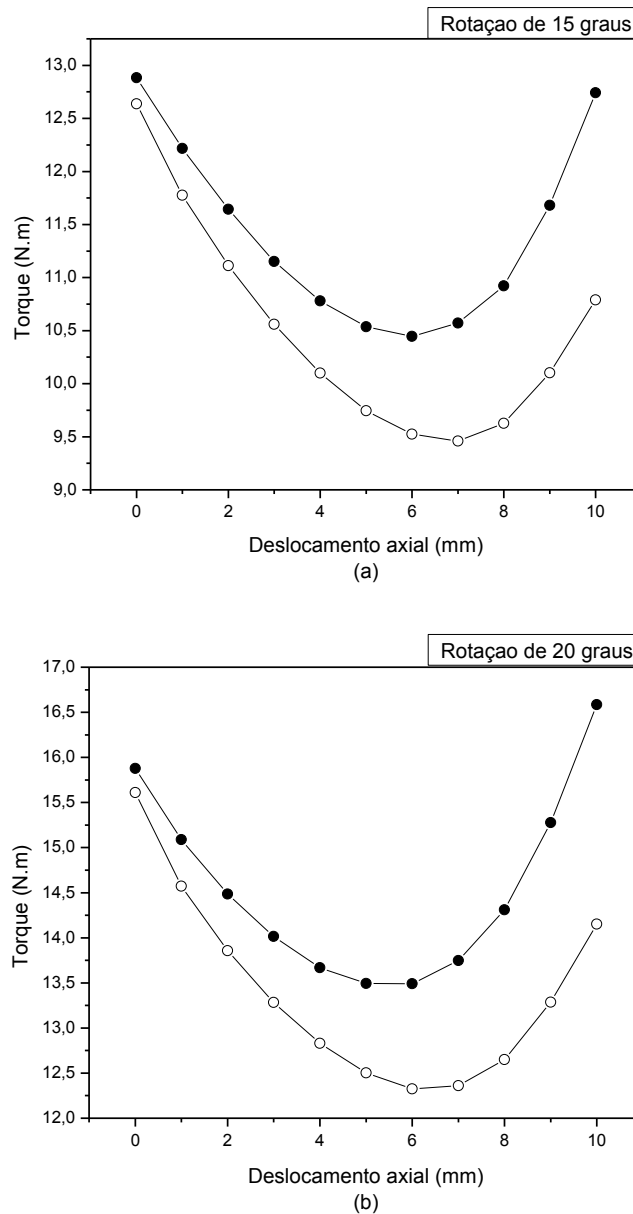


Figura 54 – Em (a) torque para o ângulo de 15° em função do deslocamento axial e (b) torque para o ângulo de 20° em função do deslocamento axial.

Observa-se por meio dos gráficos apresentados que a resposta em torque para os ângulos de rotação de 5° , 10° e 15° em função do acoplamento dos deslocamentos axiais até 10,00 mm, foi sempre menor do que a resposta em torque para nenhum deslocamento axial acoplado.

Segundo Yeoh (1993), a extensão das ligações cruzadas nas cadeias poliméricas é uma possível causa do comportamento não linear da resposta em torque para um determinado ângulo de rotação em função do acoplamento de deslocamentos axiais. O efeito relacionado à

diminuição do torque refere-se ao processo de extensão e alinhamento das ligações emaranhadas nas cadeias poliméricas até o seu limite. Reticulações na rede polimérica e emaranhamentos são uma possível causa para a diminuição da rigidez em pequenas deformações. Quando a deformação acoplada é imposta, a tensão de cisalhamento em função do deslocamento axial provoca um comportamento de diminuição da rigidez, isto é, redução na resposta em torque.

A Figura 55 apresenta um gráfico do torque em função dos deslocamentos axiais de 0,00 a 10,00 mm, para um ângulo de rotação de 25° em (a), e um gráfico do torque em função dos deslocamentos axiais de 0,00 a 10,00 mm, para um ângulo de rotação de 30° em (b).

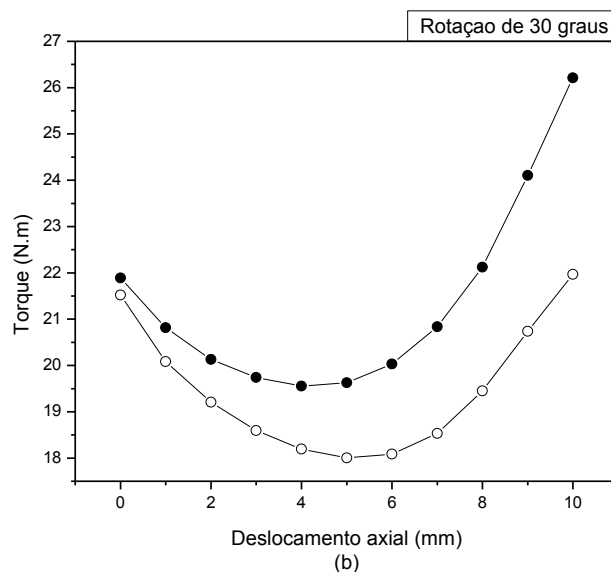
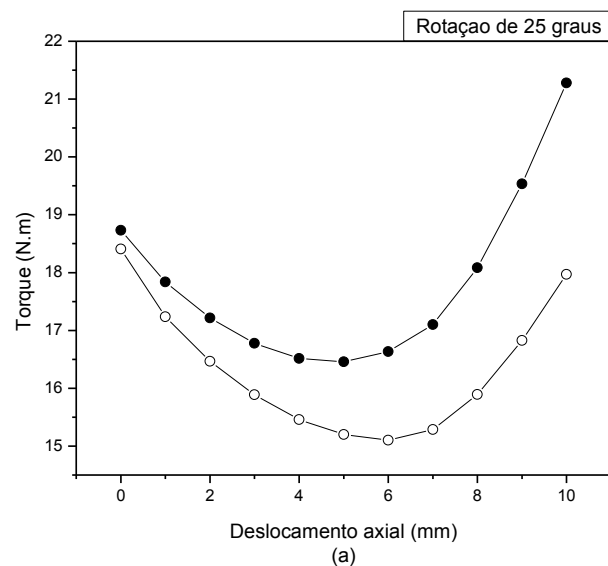


Figura 55 – Em (a) torque para o ângulo de 25° em função do deslocamento axial e em (b) torque para o ângulo de 30° em função do deslocamento axial.

Outra observação importante a se fazer é que a resposta em torque para o ângulo de rotação de 20° em função do acoplamento dos deslocamentos axiais até 9,00 mm, para o ângulo de rotação de 25° em função do acoplamento dos deslocamentos axiais até 8,00 mm, e para o ângulo de rotação de 30° em função do acoplamento dos deslocamentos axiais até 7,00 mm, foi menor do que a resposta em torque para nenhum deslocamento axial acoplado.

Observou-se ainda que a resposta em torque para o ângulo de rotação de 20° em função do acoplamento do deslocamento axial de 10,00 mm, que a resposta em torque para o ângulo de rotação de 25° em função do acoplamento dos deslocamentos axiais de 9,00 mm e 10,00 mm e que a resposta em torque para o ângulo de rotação de 30° em função do acoplamento dos deslocamento axiais de 8,00 mm e 9,00 mm, teve um valor de pico superior a resposta em torque para nenhum deslocamento axial acoplado, mas relaxou para um valor inferior a resposta em torque para nenhum deslocamento axial acoplado. Somente a resposta em torque em função do ângulo de rotação de 30° para o acoplamento do deslocamento axial de 10,00 mm teve uma resposta em torque com valor superior tanto no torque de pico quanto no torque após o relaxamento superior a resposta em torque para nenhum deslocamento axial acoplado.

Segundo Yeoh (1993), a presunção da extensibilidade finita nas cadeias da rede explica o comportamento de aumento da rigidez em grandes deformações, ou seja, o aumento da resposta em torque para um determinado ângulo de rotação, para maiores deslocamentos axiais acoplados. Desse ponto de vista, o processo de fabricação das buchas pode influenciar significativamente no seu comportamento mecânico, uma vez que a forma ou posição de injeção da borracha pode gerar certa anisotropia em função do alinhamento preferencial das cadeias poliméricas da borracha. O processo de fabricação pode também contribuir para o comportamento de diminuição e aumento da rigidez, uma vez que a bucha possui uma tensão inicial de compressão na direção radial devido à operação de estampagem.

A Figura 56 apresenta o gráfico da variação percentual do torque para os ângulos de rotação de 5, 10, 20 e 30 graus em função dos deslocamentos axiais de 0,00 a 10,00 mm. A variação percentual do torque é o quando o torque varia em termos de porcentagem, para o deslocamento axial imposto, em relação ao torque para deslocamento axial nulo. O gráfico da variação percentual do torque para os ângulos de rotação de 5, 10, 20 e 30 graus em função do deslocamento axial, foi plotado a partir dos dados dos gráficos das Figuras 53(a), 53(b), 54(b) e 55(b), para o torque após o relaxamento.

Observa-se que a resposta em torque é significativamente afetada pela quantidade de deslocamento axial, principalmente para pequenos ângulos de rotação da luva interna. A máxima diminuição da rigidez, na ordem de 42,59%, foi observada para o ângulo de rotação de 5 graus com o deslocamento axial acoplado de 8,00 mm. Já o maior aumento da rigidez, na ordem de 2,1%, foi observado para o ângulo de 30 graus com o deslocamento axial acoplado de 10,00 mm.

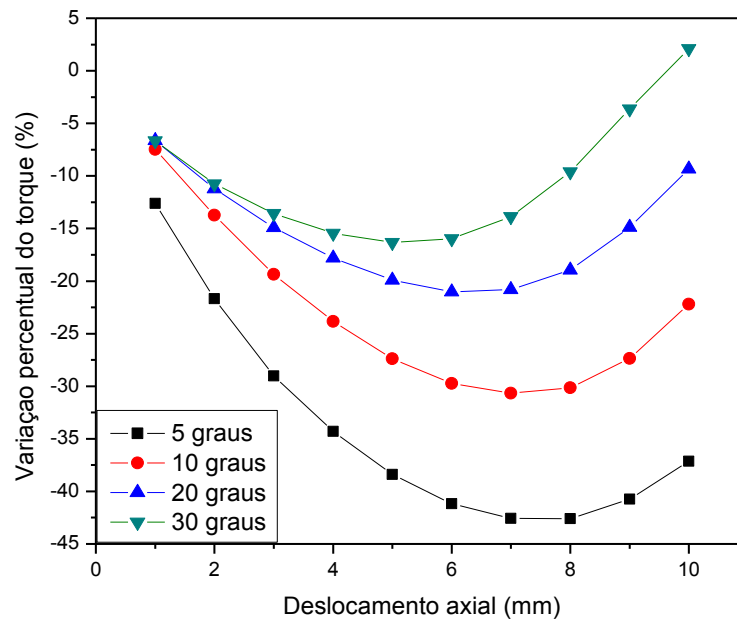


Figura 56 - Variação percentual no torque em função do deslocamento axial.

Observou-se por meio dos gráficos apresentados que o torque mínimo para o ângulo de rotação de 5 graus ocorreu com o deslocamento axial acoplado de 8,00 mm, para o ângulo de 10 graus com o deslocamento axial acoplado de 7,00 mm, para o ângulo de rotação de 20 graus com o deslocamento axial acoplado de 6,00 mm e para o ângulo de 30 graus o torque mínimo foi observado quando se tinha um deslocamento axial acoplado de 5,00 mm.

Partindo do fato que o efeito relacionado à diminuição do torque refere-se ao processo de extensão e alinhamento das ligações emaranhadas nas cadeias poliméricas até o seu limite, explica-se o porquê de para ângulos de rotações maiores o torque mínimo ser alcançado com deslocamentos menores. A deformação de rotação já provoca um alinhamento das cadeias poliméricas, e quanto maior esta rotação menor será o deslocamento axial necessário para se ter o alinhamento total das cadeias, onde o efeito de diminuição do torque termina e começa o efeito de aumento do torque.

A Figura 57 apresenta o gráfico da variação percentual do relaxamento torcional para os ângulos de 5, 10, 20 e 30 graus em função dos deslocamentos axiais de 0,00 a 10,00 mm. A relaxação, que é a diminuição do torque, que é a diferença entre um ponto e outro para um mesmo deslocamento representado no gráfico, foi medida após o deslocamento axial ser imposto, que corresponde ao intervalo entre t_3 e t_4 na rampa de deslocamento utilizada para realização do ensaio (Figura 33).

Nota-se que o relaxamento torcional em termos de porcentagem apresenta-se maior para os ângulos menores até o ângulo de 20 graus. Para o ângulo de rotação de 30 graus foi observado um aumento na variação percentual do torque em relação ao ângulo de 20 graus.

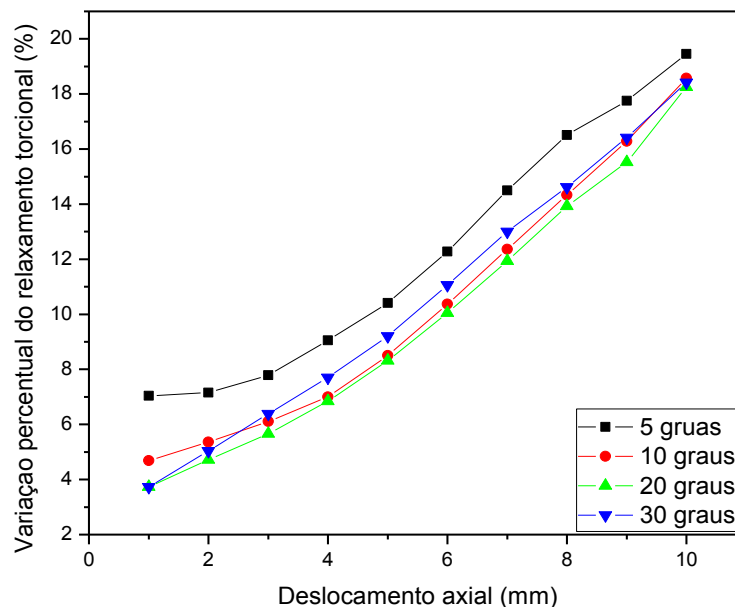


Figura 57. Variação percentual do relaxamento torcional em função do deslocamento axial.

A Figura 58 apresenta um gráfico da resposta em força axial para os ângulos de rotação de 5, 10, 20 e 30 graus, em função dos deslocamentos axiais de 0,00 a 10,00 mm, onde se observa que a resposta em força axial na bucha no modo acoplado, não é muito afetada pela rotação da luva interna para deslocamentos axiais de 0,00 a 5,00 mm, diferentemente ao que acontece para deslocamentos axiais entre 5,00 e 10,00 mm, onde se observa um aumento da resposta em força axial. Por meio do gráfico nota-se também uma não linearidade na resposta em força, que é uma característica do material de elastômero utilizado na fabricação da bucha.

A presunção da extensibilidade finita nas cadeias da rede novamente explica o comportamento de aumento da rigidez em grandes deformações. O aumento da deformação torcional gera um aumento significativo da resposta em força axial para um mesmo deslocamento axial, para deslocamentos maiores que 5,00 mm. Até 5,00 mm onde não se tem o alinhamento total das cadeias poliméricas não é observado uma variação significativa da resposta em força axial.

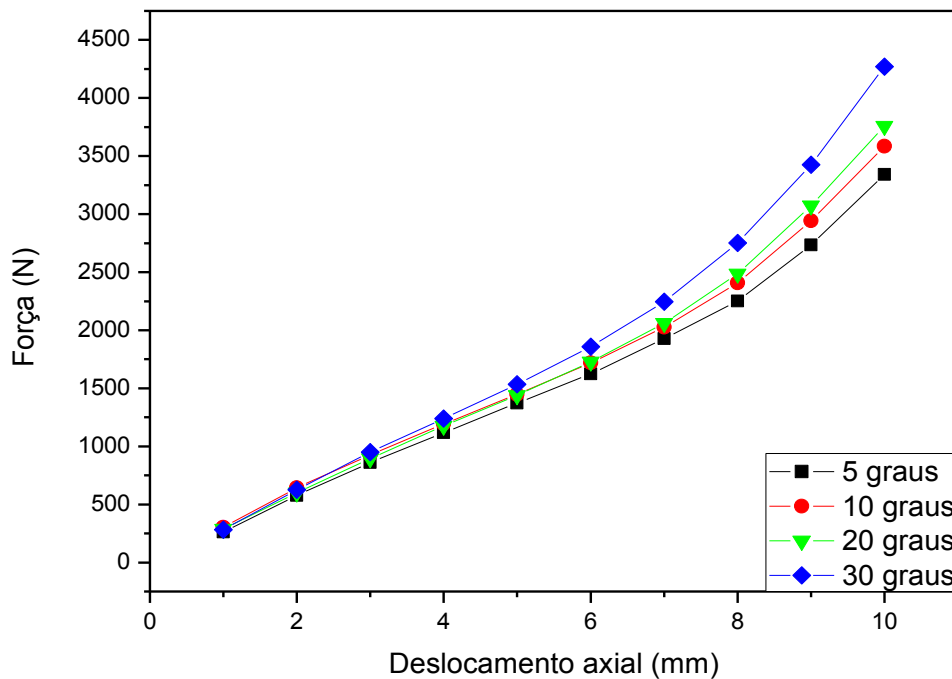


Figura 58. Força axial para os ângulos em função do deslocamento axial.

Para o deslocamento axial máximo utilizado no ensaio que foi de 10,00 mm, observou-se por meio dos resultados um aumento de 27,77 % na resposta em força axial após o relaxamento para o ângulo de rotação acoplado de 30° em relação a ângulo de rotação acoplado de 5°.

O comportamento de diminuição da rigidez e aumento da rigidez devido a solicitações acopladas apresentado é importante na prática, devido ao fato de que as buchas de borracha sofrem cargas combinadas na direção de torção e axial sob condições normais de carga.

4.1 RESULTADOS DOS ENSAIOS DINÂMICOS

Os resultados dos ensaios dinâmicos da bucha de borracha, para os modos de deformação axial, torcional, radial e axial-torcional acoplado, quando submetida a diferentes amplitudes e taxas de deformação são apresentados e discutidos no decorrer deste capítulo, com a finalidade de avaliar o comportamento dinâmico da bucha sob estas solicitações.

Os resultados dos ensaios dinâmicos neste trabalho são apresentados na forma de ciclo de histerese. Segundo Gheller et al (2007), quando se submete um material viscoelásticos a um carregamento cíclico e se faz um gráfico de força dinâmica em função do deslocamento dinâmico, ou torque dinâmico por rotação dinâmica em um ciclo completo, o efeito da dissipação viscosa do material aparece. Este gráfico é chamado de ciclo de histerese e possui o formato de uma elipse. As características lineares são observadas pela forma elíptica pura da curva. As não linearidades são caracterizadas por distorções na curva de histerese (elipse), onde a mesma tende a tomar a forma de um S.

Precedendo a realização dos ensaios dinâmicos foi realizado o condicionamento mecânico das amostras, seguindo-se o mesmo procedimento utilizado para os ensaios estáticos. Um deslocamento axial/radial prévio foi aplicado a uma taxa de 0,0833 mm/s para os ensaios axiais/radiais, e um ângulo de rotação foi aplicado a uma taxa de 1°/s para os ensaios de torção. O condicionamento mecânico consistiu em três ciclos a uma amplitude de 115 % da amplitude de deslocamento do teste a ser realizado.

4.1.1 Resultados dos ensaios dinâmicos para o modo de deformação axial

Resultados dos ensaios dinâmicos para o modo de deformação axial para uma série de pequenos deslocamentos (0,50 mm, 1,00 mm, 1,50 mm e 2,00 mm) e frequências maiores (5 Hz, 10 Hz, 15 Hz e 20 Hz) e para outra série de maiores deslocamentos (2,50 mm, 5,00 mm, 7,50 mm e 10,00 mm) e frequências menores (1 Hz, 2 Hz, 3 Hz e 4 Hz) são apresentados e discutidos abaixo. Os ensaios foram assim divididos com a finalidade de avaliar o comportamento mecânico dependente da frequência e da amplitude de deformação para a bucha de borracha.

Para a primeira série de ensaios realizados para o modo de deformação axial, onde utilizou-se pequenos deslocamentos (0,50 mm, 1,00 mm, 1,50 mm e 2,00 mm) e frequências maiores (5 Hz, 10 Hz, 15 Hz e 20 Hz), pôde-se observar que para baixos deslocamentos as respostas apresentaram-se lineares e o aumento da frequência provocou um aumento considerável da resposta em força.

A Figura 59 apresenta em (a) um gráfico da resposta em força axial em função dos deslocamentos de 0,50 mm, 1,00 mm, 1,50 mm e 2,00 mm para a frequência de 5 Hz, e em (b) um gráfico da resposta em força axial em função dos deslocamentos de 0,50 mm, 1,00 mm, 1,50 mm e 2,00 mm para a frequência de 20 Hz.

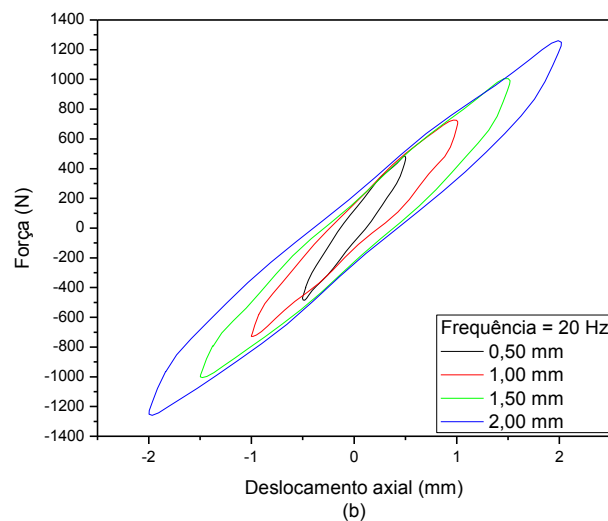
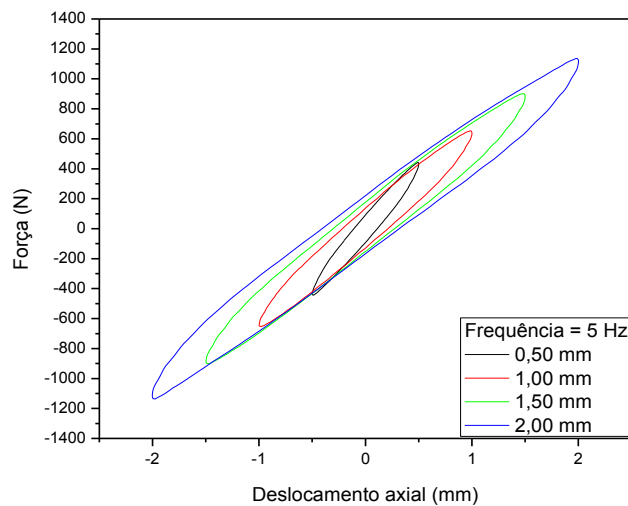


Figura 59 – Em (a) forças axiais em função dos deslocamentos de 0,50 mm, 1,00 mm, 1,50 mm e 2,00 mm para a frequência de 5 Hz e em (b) forças axiais em função do deslocamento de 0,50 mm, 1,00 mm, 1,50 mm e 2,00 mm para a frequência de 20 Hz.

Observou-se por meio dos resultados que a resposta em força em função do deslocamento para esses deslocamentos e frequências apresenta características lineares.

A Figura 60 apresenta em (a) um gráfico da resposta em força axial em função do deslocamento de 0,50 mm, para as frequências de 5 Hz, 10 Hz, 15 Hz, e 20 Hz e em (b) um gráfico da resposta em força axial em função dos deslocamentos de 2,00 mm para a frequência de 5 Hz, 10 Hz, 15 Hz, e 20 Hz. Observa-se por meio dos gráficos apresentados que existe um aumento da força axial com o aumento da frequência. Os valores das forças axiais para os deslocamentos de 0,50 mm e 2,00 mm para as frequências de 5 Hz, 10 Hz, 15 Hz e 20 Hz são apresentados na Tabela 11.

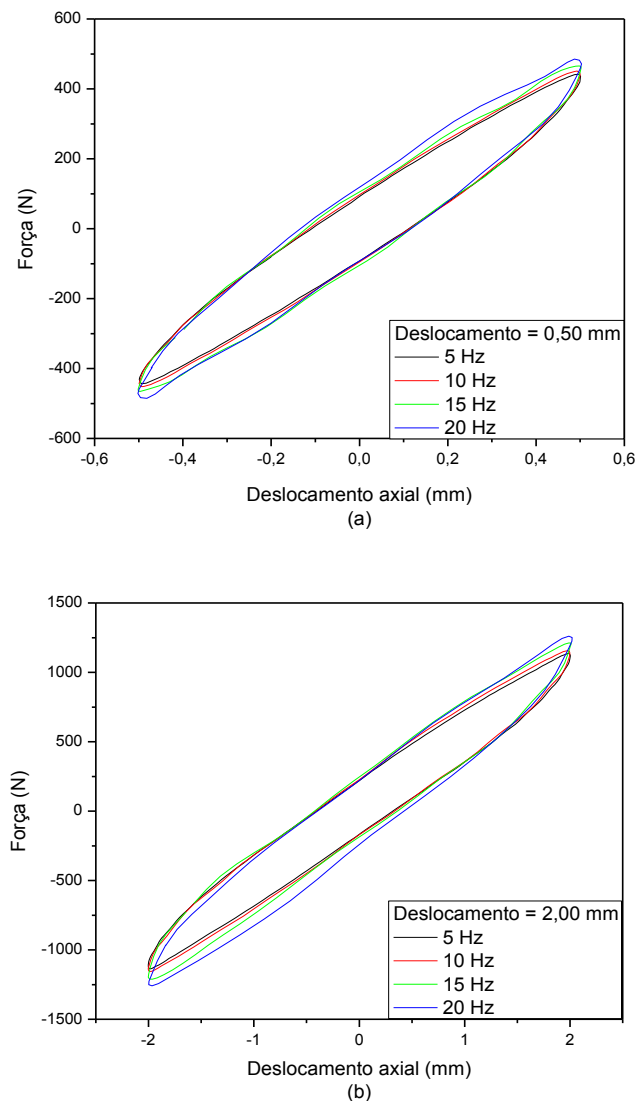


Figura 60 – Em (a) forças axiais em função dos deslocamentos de 0,50 mm para as frequências de 5 Hz, 10 Hz, 15 Hz e 20 Hz e em (b) forças axiais em função do deslocamento de 2,00 mm para as frequências de 5 Hz, 10 Hz, 15 Hz e 20 Hz.

Observa-se também por meio dos gráficos apresentados que o módulo dinâmico diminui com o aumento da amplitude de deformação, e que o mesmo aumenta com o aumento da frequência.

Tabela 11 – Forças axiais para os deslocamentos de 0,50 mm e 2,00 mm para as frequências de 5 Hz, 10 Hz, 15 Hz e 20 Hz.

| Deslocamento (mm) | | 0,50 | | |
|--------------------------|---------|-------------|---------|---------|
| Frequência (Hz) | 5 | 10 | 15 | 20 |
| Força (N) | 442,62 | 451,80 | 466,23 | 485,25 |
| Deslocamento (mm) | | 2,00 | | |
| Frequência (Hz) | 5 | 10 | 15 | 20 |
| Força (N) | 1139,34 | 1157,38 | 1213,11 | 1262,30 |

Esse aumento da força axial com o aumento da taxa de deformação para as buchas de borracha acontece porque as longas cadeias moleculares da borracha precisam de tempo para escoar uma em relação a outra. Os emaranhamentos ocorrem entre e ao longo das cadeias moleculares. Se a bucha de borracha é deformada, a uma taxa mais rápida do que as cadeias podem deslizar umas sobre as outras, o material se comporta como se as cadeias fossem mais curtas, isto é, o material tem uma resposta mais rígida. E esta rigidez é maior quanto maior for a taxa de deformação (Kadlovec et al, 2003).

Observa-se também por meio dos resultados apresentados que existe um aumento da área sob a curva de histerese com o aumento da frequência. Sendo que a área sob a curva representa o quanto o material perde em calor e danos internos a sua estrutura (Gheller et al, 2007), pode-se concluir que o aumento da frequência provoca maior dano à estrutura do material.

Para a segunda série de ensaios realizados para o modo de deformação axial, onde utilizou-se deslocamentos maiores (2,50 mm, 5,00 mm, 7,50 mm e 10,00 mm), e frequências menores (1 Hz, 2 Hz, 3 Hz e 4 Hz), pôde-se observar que para deslocamentos maiores, as respostas apresentaram características não lineares, e o aumento da frequência provocou um aumento considerável da resposta em força.

A Figura 61 apresenta em (a) um gráfico da resposta em força axial em função dos deslocamentos de 2,50 mm, 5,00 mm, 7,50 mm e 10,00 mm para a frequência de 1 Hz, e em (b) um gráfico da resposta em força axial em função dos deslocamentos de 2,50 mm, 5,00 mm, 7,50 mm e 10,00 mm para a frequência de 4 Hz.

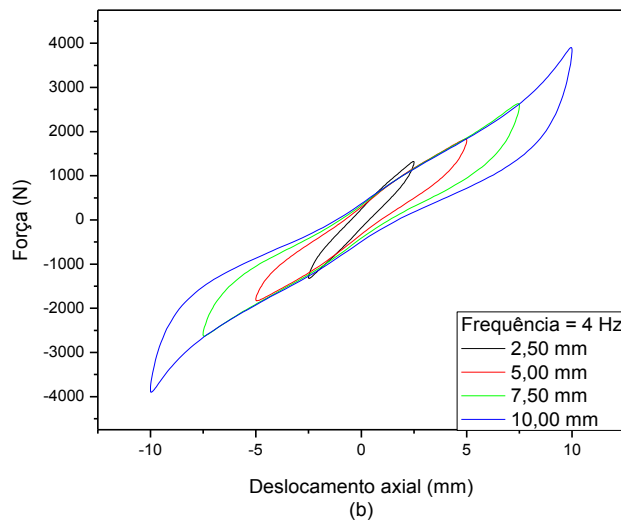
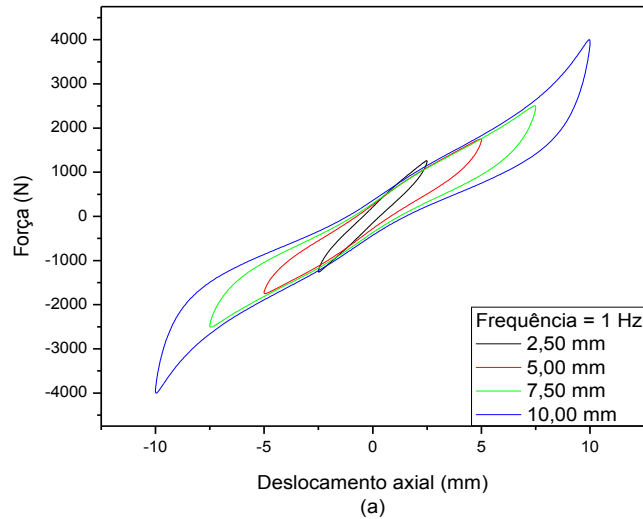
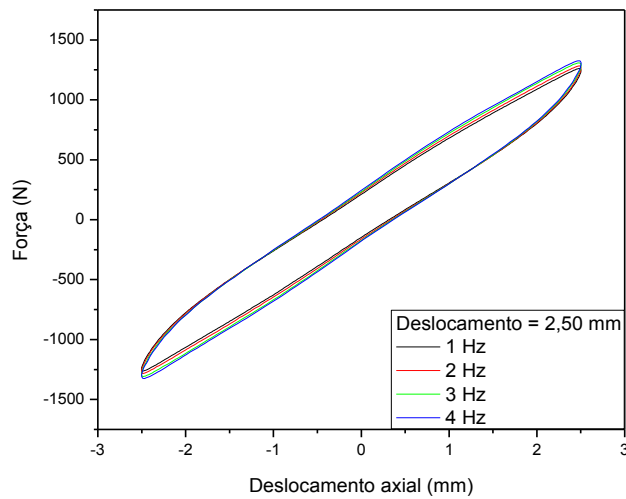


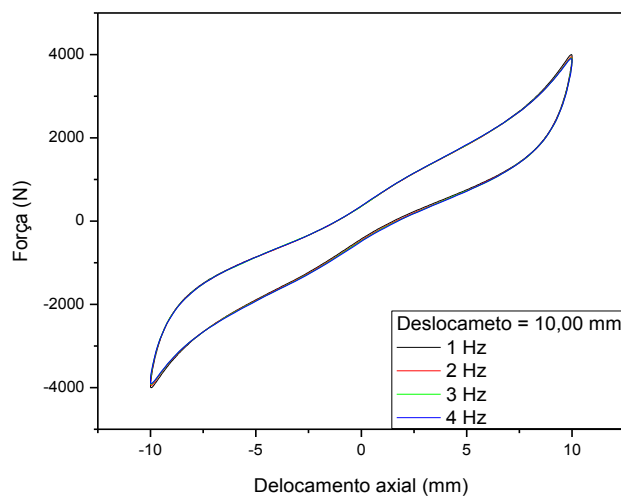
Figura 61 – Em (a) forças axiais em função dos deslocamentos de 2,50 mm, 5,00 mm, 7,50 mm e 10,00 mm para a frequência de 1 Hz e em (b) forças axiais em função do deslocamento de 2,50 mm, 5,00 mm, 7,50 mm e 10,00 mm para a frequência de 4 Hz.

Observa-se com os gráficos apresentados que a resposta em força em função do deslocamento para esses deslocamentos e frequências apresentam características lineares para os deslocamentos de 2,50 mm e 5,00 mm e começam a apresentar características não lineares a partir de um deslocamento de 7,50 mm. Para o deslocamento de 10,00 mm a resposta em força em função do deslocamento mostra-se não linear.

A Figura 62 apresenta em (a) um gráfico da resposta em força axial em função do deslocamento de 2,50 mm, para as frequências de 1 Hz, 2 Hz, 3 Hz, e 4 Hz e em (b) um gráfico da resposta em força axial em função dos deslocamentos de 10,00 mm para a frequência de 1 Hz, 2 Hz, 3 Hz, e 4 Hz. Observou-se com os resultados que a resposta em força em função do deslocamento para esses deslocamentos e frequências apresenta características lineares para o deslocamento de 2,50 mm e não linearidades são observadas para o deslocamento de 10,00 mm. Nota-se também por meio dos gráficos apresentados que existe um discreto aumento da força axial com o aumento da frequência. Os valores das forças axiais para os deslocamentos de 2,50 mm e 10,00 mm para as frequências de 1 Hz, 2 Hz, 3 Hz e 4 Hz são apresentados na Tabela 12.



(a)



(b)

Figura 62 – Em (a) forças axiais em função dos deslocamentos de 2,50 mm para as frequências de 1 Hz, 2 Hz, 3 Hz e 4 Hz e em (b) forças axiais em função do deslocamento de 10,00 mm para as frequências de 1 Hz, 2 Hz, 3 Hz e 4 Hz.

Observou-se por meio dos gráficos apresentados que a resposta dinâmica para o modo de deformação axial para a bucha de borracha ensaiada, apresenta características lineares para deslocamentos até 5,00 mm, e não linearidades são observadas para deslocamentos maiores que 7,50 mm. Nota-se também que houve um aumento da força axial com o aumento da taxa de deformação, fenômeno que também foi observado para o estudo realizado nesta dissertação para os ensaios estáticos para o modo de deformação axial.

Observa-se também por meio dos gráficos apresentados que o módulo dinâmico diminui com o aumento da amplitude de deformação. Este efeito é muitas vezes denotado por Efeito Payne devido aos estudos em elastômeros reforçados realizados por Payne (1965). O autor interpretou a diminuição no módulo com o aumento da amplitude de deformação como resultado da ruptura e reforma da estrutura de enchimento. A estrutura é composta por agregados mantidos juntos por ligações de Van der Waals.

Tabela 12 – Forças axiais para os deslocamentos de 2,50 mm e 10,00 mm para as frequências de 1 Hz, 2 Hz, 3 Hz e 4 Hz.

| Deslocamento (mm) | | 2,50 | | |
|--------------------------|---------|--------------|---------|---------|
| Frequência (Hz) | 1 | 2 | 3 | 4 |
| Força (N) | 1266,12 | 1285,25 | 1310,11 | 1327,32 |
| Deslocamento (mm) | | 10,00 | | |
| Frequência (Hz) | 1 | 2 | 3 | 4 |
| Força (N) | 3907,10 | 3928,96 | 3950,82 | 4005,46 |

4.1.2 Resultados dos ensaios dinâmicos para o modo de deformação torcional

Resultados dos ensaios dinâmicos para o modo de deformação torcional para uma série de rotações (5 graus, 6 graus, 7 graus e 8 graus) e frequências (5 Hz, 6 Hz, 7 Hz e 8 Hz) e para outra série de rotações maiores (5 graus, 10 graus, 20 graus e 30 graus) e frequências menores (1 Hz, 2 Hz, 3 Hz e 4 Hz) são apresentados e discutidos abaixo.

Para a primeira série de ensaios realizados para o modo de deformação torcional, onde se utilizou as rotações (5 graus, 6 graus, 7 graus e 8 graus) e as frequências (5 Hz, 6 Hz, 7 Hz

e 8 Hz), pôde-se observar que para estas rotações as respostas são lineares e o aumento da frequência provocou um aumento da resposta em força.

A Figura 63 apresenta em (a) um gráfico da resposta em torque em função da rotação de 5 graus, 6 graus, 7 graus, e 8 graus para a frequência de 5 Hz, e em (b) um gráfico da resposta em força axial em função dos deslocamentos de 5 graus, 6 graus, 7 graus, e 8 graus para a frequência de 8 Hz. Observa-se por meio dos gráficos que a resposta em torque em função das rotações para estas rotações e frequências apresenta características lineares.

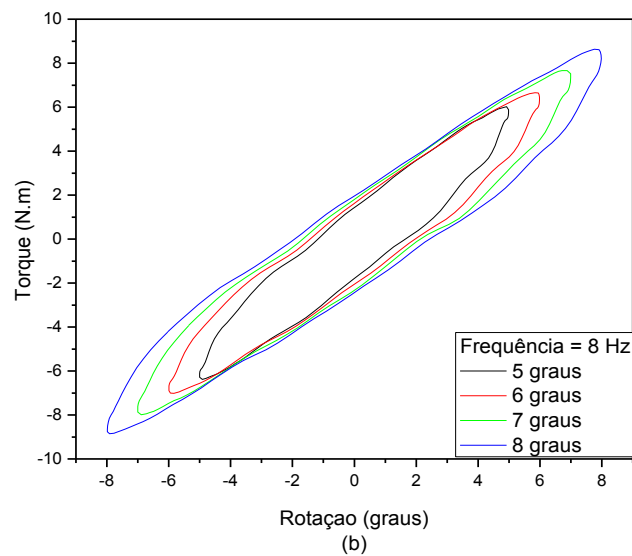
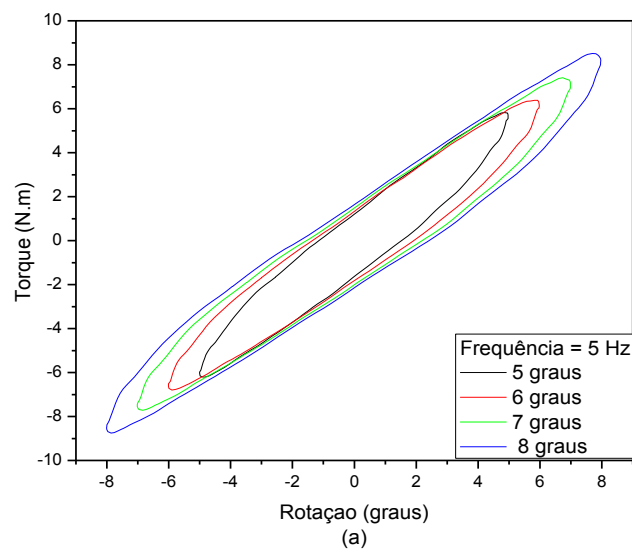


Figura 63 – Em (a) torque em função da rotação de 5 graus, 6 graus, 7 graus, e 8 graus para a frequência de 5 Hz e em (b) torque em função da rotação de 5 graus, 6 graus, 7 graus, e 8 graus para a frequência de 8 Hz.

A Figura 64 apresenta em (a) um gráfico da resposta em torque em função da rotação de 5 graus, para as frequências de 5 Hz, 6 Hz, 7 Hz, e 8 Hz e em (b) um gráfico da resposta em torque em função da rotação de 8 graus para as frequências de 5 Hz, 6 Hz, 7 Hz, e 8 Hz. Observa-se por meio dos gráficos apresentados que existe um pequeno aumento da resposta em torque com o aumento da frequência. Os valores dos torques para os ângulos de 5 graus e 8 graus para as frequências de 5 Hz, 6 Hz, 7 Hz e 8 Hz são apresentados na Tabela 13.

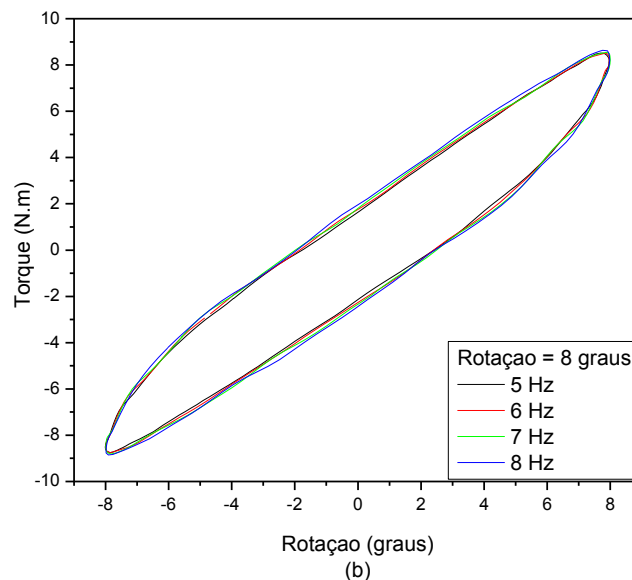
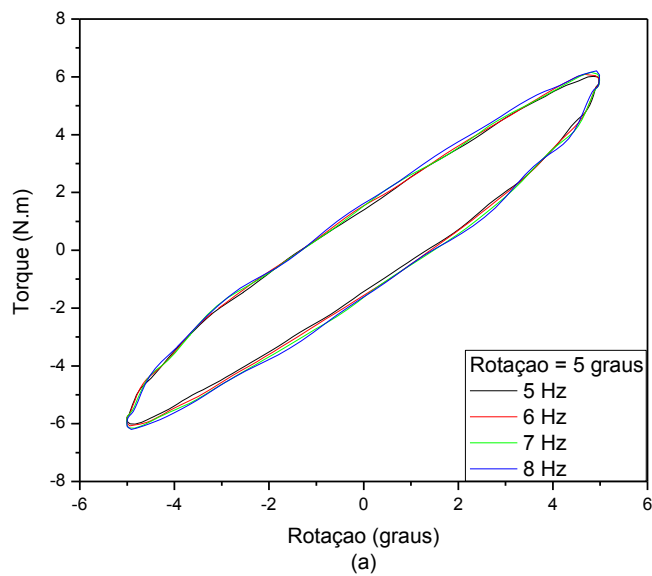


Figura 64 – Em (a) torque em função da rotação de 5 graus para as frequências de 5 Hz, 6 Hz, 7 Hz, e 8 Hz e em (b) torque em função da rotação de 8 graus para a frequência de 5 Hz, 6 Hz, 7 Hz, e 8 Hz.

Tabela 13 – Torques para os ângulos de 5 graus e 8 graus para as frequências de 5 Hz, 6 Hz, 7 Hz e 8 Hz.

| Ângulo (graus) | | 5 | | |
|-----------------|------|------|------|------|
| Frequência (Hz) | 5 | 6 | 7 | 8 |
| Torque (N.m) | 6,05 | 6,09 | 6,16 | 6,22 |
| Ângulo (graus) | | 8 | | |
| Frequência (Hz) | 5 | 6 | 7 | 8 |
| Torque (N.m) | 8,53 | 8,54 | 8,57 | 8,65 |

Para a segunda série de ensaios realizados para o modo de deformação torcional, onde se utilizou rotações maiores (5 graus, 10 graus, 20 graus e 30 graus) e frequências menores (1 Hz, 2 Hz, 3 Hz e 4 Hz), pode-se observar que rotações maiores induziram a respostas não lineares e o aumento da frequência provocou um aumento da resposta em força.

A Figura 65 apresenta em (a) um gráfico da resposta em torque em função da rotação de 5 graus, 10 graus, 20 graus, e 30 graus para a frequência de 1 Hz, e em (b) um gráfico da resposta em torque em função das rotações de 5 graus, 10 graus, 20 graus, e 30 graus para a frequência de 4 Hz.

Observou-se com os resultados que a resposta em torque em função da rotação para estas rotações e frequências apresenta características lineares para as rotações de 5 graus e 10 graus e começam a apresentar características não lineares para a rotação de 20 graus. Para a rotação de 30 graus a resposta em torque em função da rotação mostra-se não linear.

Observa-se também por meio dos gráficos que existe um aumento da área sob a curva de histerese com o aumento da frequência, indicando que o aumento da frequência provoca maior dano à estrutura do material. Nota-se também uma diminuição da rigidez torcional com o aumento da rotação. Este efeito é muitas vezes denotado por Efeito Payne devido aos estudos em elastômeros reforçados realizados por Payne (1965). O autor interpreta a diminuição na rigidez com o aumento da amplitude de deformação como resultado da ruptura e reforma da estrutura de enchimento.

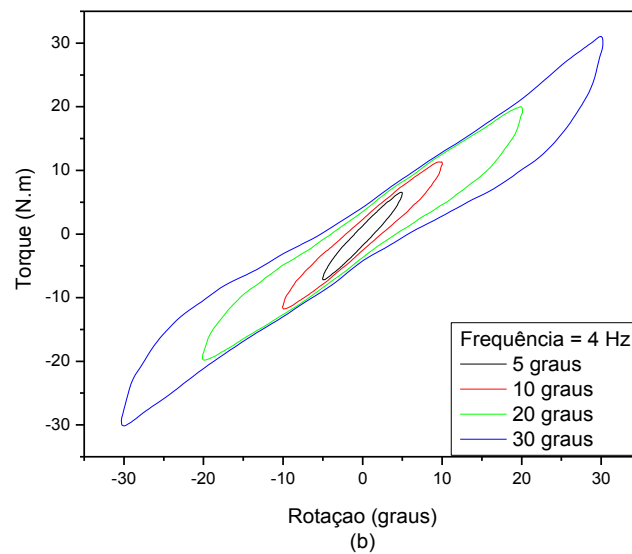
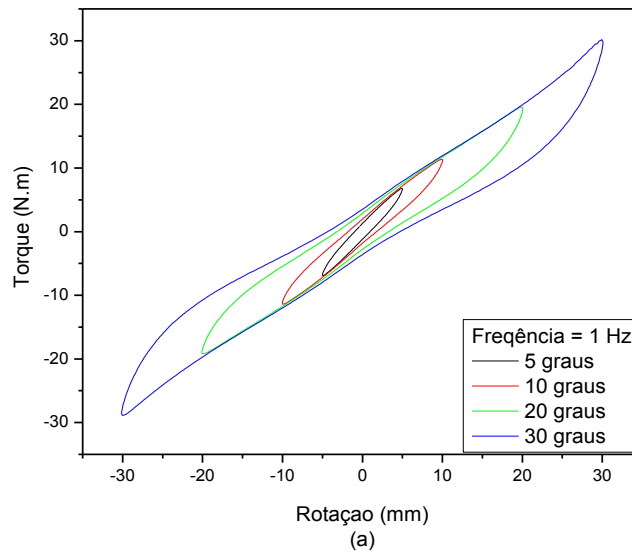


Figura 65 – Em (a) torque em função da rotação de 5 graus, 10 graus, 20 graus e 30 graus para a frequência de 1 Hz e em (b) torque em função da rotação de 5 graus, 10 graus, 20 graus e 30 graus para a frequência de 4 Hz.

A Figura 66 apresenta em (a) um gráfico da resposta em torque em função da rotação de 5 graus, para as frequências de 1 Hz, 2 Hz, 3 Hz, e 4 Hz e em (b) um gráfico da resposta em torque em função da rotação de 30 graus para as frequências de 1 Hz, 2 Hz, 3 Hz, e 4 Hz. Observa-se por meio dos gráficos apresentados que existe um discreto aumento da resposta em torque com o aumento da frequência. Os valores dos torques para os ângulos de 5 graus e 30 graus para as frequências de 1 Hz, 2 Hz, 3 Hz e 4 Hz são apresentados na Tabela 14.

Tabela 14 – Torques para os ângulos de 5 graus e 30 graus para as frequências de 1 Hz, 2 Hz, 3 Hz e 4 Hz.

| Ângulo (graus) | | 5 | | | |
|------------------------|-------|-----------|-------|-------|--|
| Frequência (Hz) | 1 | 2 | 3 | 4 | |
| Torque (N.m) | 5,83 | 5,91 | 6,01 | 6,04 | |
| Ângulo (graus) | | 30 | | | |
| Frequência (Hz) | 1 | 2 | 3 | 4 | |
| Torque (N.m) | 29,61 | 29,87 | 30,37 | 30,75 | |

O aumento da resposta em torque com o aumento da taxa de deformação para as buchas de borracha acontece porque as longas cadeias moleculares da borracha precisam de tempo para escoar uma em relação a outra. Se a bucha de borracha é deformada, a uma taxa mais rápida do que as cadeias podem deslizar umas sobre as outras, o material se comporta como se as cadeias fossem mais curtas, isto é, o material tem uma resposta mais rígida. E esta rigidez é maior quanto maior for a taxa de deformação (Kadlovec et al, 2003).

Observou-se por meio dos gráficos apresentados que a resposta dinâmica para o modo de deformação torcional para a bucha de borracha ensaiada, apresenta características lineares para rotações até 10 graus, e não linearidades são observadas para rotações maiores que 10 graus. Nota-se também que houve um aumento do torque com o aumento da taxa de deformação, fenômeno que também foi observado para o estudo realizado nesta dissertação para os ensaios estáticos para o modo de deformação torcional.

Observa-se também que existe um aumento da área sob a curva de histerese com o aumento da frequência. Segundo (Gheller et al, 2007) a área sob a curva de histerese representa o quanto o material perde em calor e danos internos a sua estrutura, pode-se concluir que o aumento da frequência provoca maior dano à estrutura do material. Esse fenômeno do aumento da área sob a curva de histerese com o aumento da frequência de excitação também foi observado para os ensaios dinâmicos realizados para o modo de deformação axial.

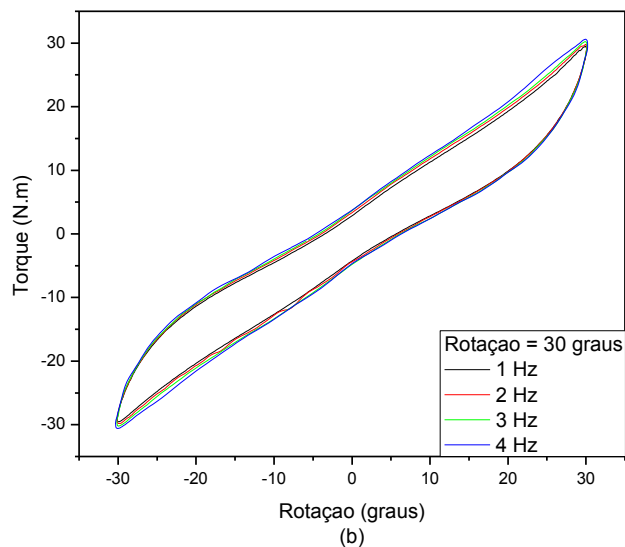
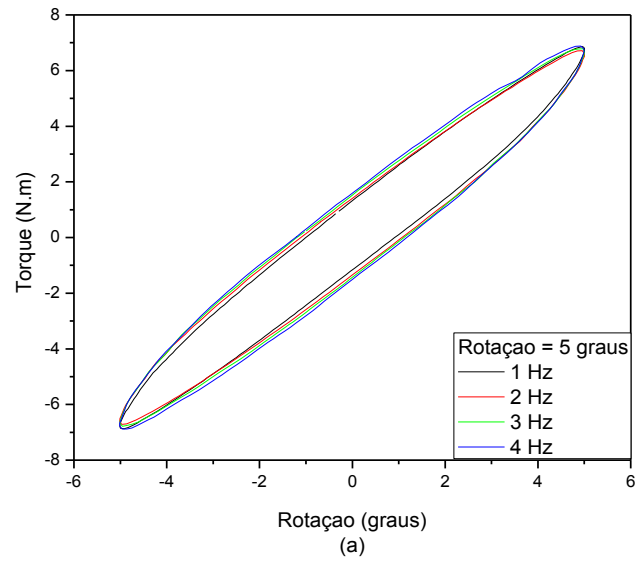


Figura 66 – Em (a) torque em função da rotação de 5 graus para as frequências de 1 Hz, 2 Hz, 3 Hz e 4 Hz e em (b) torque em função da rotação de 30 graus para a frequência de 1 Hz, 2 Hz, 3 Hz e 4 Hz.

4.1.2 Resultados dos ensaios dinâmicos para o modo de deformação radial

Resultados dos ensaios dinâmicos para o modo de deformação radial para uma série de pequenos deslocamentos (0,05 mm, 0,10 mm, 0,15 mm e 0,20 mm) e frequências maiores (5 Hz, 10 Hz, 15 Hz e 20 Hz) e para outra série de deslocamentos maiores (0,25 mm, 0,50 mm, 1,00 mm e 2,00 mm) e frequências menores (1 Hz, 2 Hz, 3 Hz e 4 Hz) são apresentados e discutidos abaixo.

Para a primeira série de ensaios realizados para o modo de deformação radial, onde utilizou-se pequenos deslocamentos (0,05 mm, 0,10 mm, 0,15 mm e 0,20 mm) e frequências maiores (5 Hz, 10 Hz, 15 Hz e 20 Hz), pôde-se observar que para baixos deslocamentos as respostas apresentaram-se lineares e o aumento da frequência provocou um aumento considerável da resposta em força.

A Figura 67 apresenta em (a) um gráfico da resposta em força radial em função dos deslocamentos de 0,05 mm, 0,10 mm, 0,15 mm e 0,20 mm para a frequência de 5 Hz, e em (b) um gráfico da resposta em força radial em função dos deslocamentos de 0,05 mm, 0,10 mm, 0,15 mm e 0,20 mm para a frequência de 20 Hz.

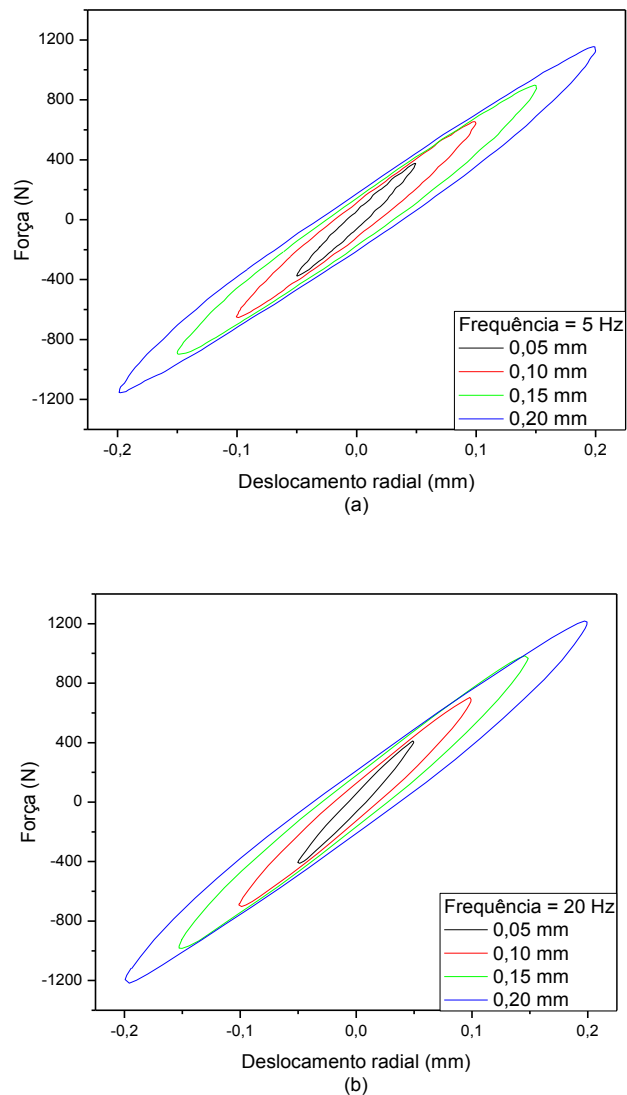
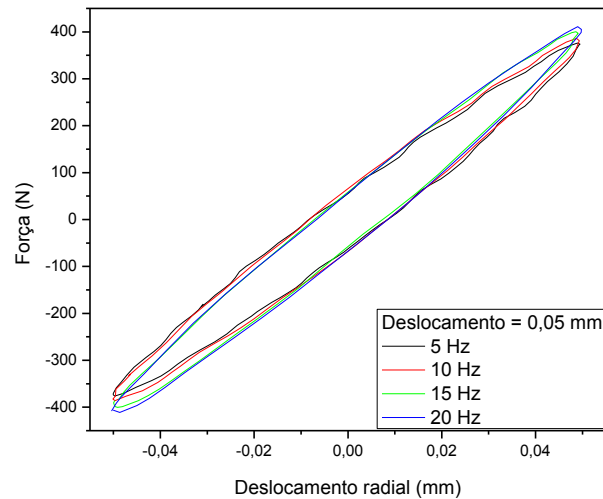


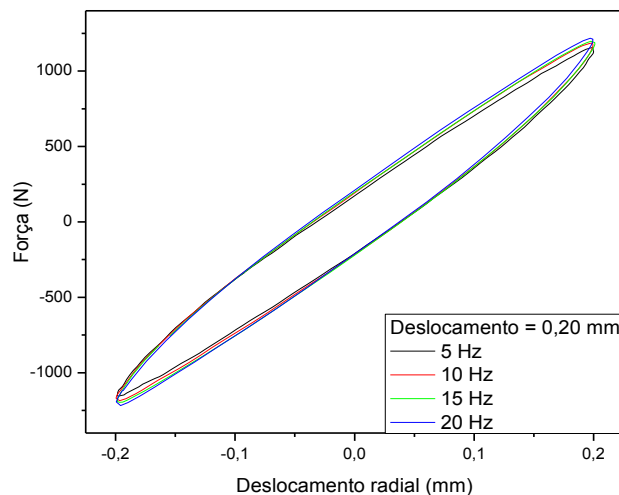
Figura 67 – Em (a) forças radiais em função dos deslocamentos de 0,05 mm, 0,10 mm, 0,15 mm e 0,20 mm para a frequência de 5 Hz e em (b) forças radiais em função do deslocamento de 0,05 mm, 0,10 mm, 0,15 mm e 0,20 mm para a frequência de 20 Hz.

Observou-se com os resultados que a resposta em força em função do deslocamento para esses deslocamentos e frequências apresenta características lineares.

A Figura 68 apresenta em (a) um gráfico da resposta em força radial em função do deslocamento de 0,05 mm, para as frequências de 5 Hz, 10 Hz, 15 Hz, e 20 Hz e em (b) um gráfico da resposta em força radial em função dos deslocamentos de 0,20 mm para a frequência de 5 Hz, 10 Hz, 15 Hz, e 20 Hz. Observa-se por meio dos gráficos apresentados que existe um aumento da força radial com o aumento da frequência. Os valores das forças radiais para o deslocamento de 0,05 mm e 0,20 mm para as frequências de 5 Hz, 10 Hz, 15 Hz e 20 Hz são apresentados na Tabela 15.



(a)



(b)

Figura 68 – Em (a) forças radiais em função dos deslocamentos de 0,05 mm para as frequências de 5 Hz, 10 Hz, 15 Hz e 20 Hz e em (b) forças radiais em função do deslocamento de 0,20 mm para as frequências de 5 Hz, 10 Hz, 15 Hz e 20 Hz.

Tabela 15 – Forças radiais para os deslocamentos de 0,05 mm e 0,20 mm para as frequências de 5 Hz, 10 Hz, 15 Hz e 20 Hz.

| Deslocamento (mm) | | 0,05 | | |
|--------------------------|---------|-------------|---------|---------|
| Frequência (Hz) | 5 | 10 | 15 | 20 |
| Força (N) | 379,18 | 388,03 | 401,31 | 411,15 |
| Deslocamento (mm) | | 0,20 | | |
| Frequência (Hz) | 5 | 10 | 15 | 20 |
| Força (N) | 1161,31 | 1190,38 | 1201,09 | 1219,45 |

Segundo Kadlovec et al (2003).esse aumento da força radial com o aumento da taxa de deformação para as buchas de borracha acontece porque as longas cadeias moleculares da borracha precisam de tempo para escoar uma em relação a outra. Os emaranhamentos ocorrem entre e ao longo das cadeias moleculares. Se a bucha de borracha é deformada, a uma taxa mais rápida do que as cadeias podem deslizar umas sobre as outras, o material se comporta como se as cadeias fossem mais curtas, isto é, o material tem uma resposta mais rígida. E esta rigidez é maior quanto maior for a taxa de deformação

Para a segunda série de ensaios realizados para o modo de deformação radial, onde utilizou-se deslocamentos maiores (0,25 mm, 0,50 mm, 1,00 mm e 2,00 mm) e frequências menores (1 Hz, 2 Hz, 3 Hz e 4 Hz), pôde-se observar que para deslocamentos maiores as respostas apresentaram características não lineares e o aumento da frequência provocou um aumento considerável da resposta em força.

A Figura 69 apresenta em (a) um gráfico da resposta em força radial em função dos deslocamentos de 0,25 mm, 0,50 mm, 1,00 mm e 2,00 mm para a frequência de 1 Hz, e em (b) um gráfico da resposta em força radial em função dos deslocamentos de 0,25 mm, 0,50 mm, 1,00 mm e 2,00 mm para a frequência de 4 Hz.

Observou-se com os resultados que a resposta em força em função do deslocamento para esses deslocamentos e frequências apresenta características lineares para deslocamentos até 1,00 mm. Para o deslocamento radial de 2,00 mm a resposta em força em função do deslocamento apresenta características não lineares.

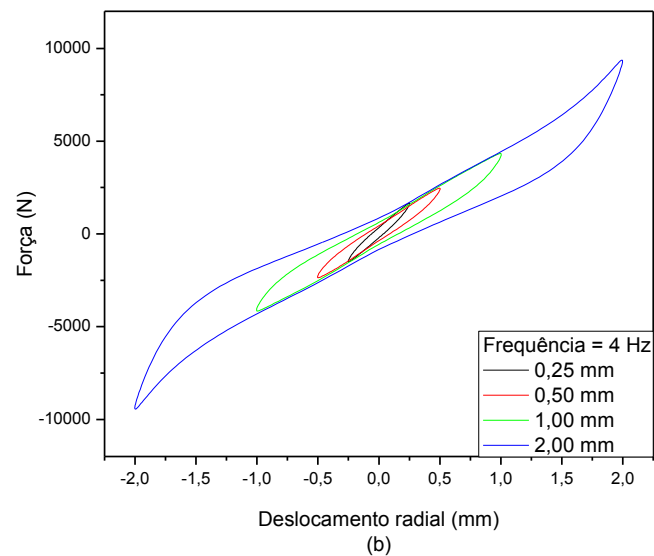
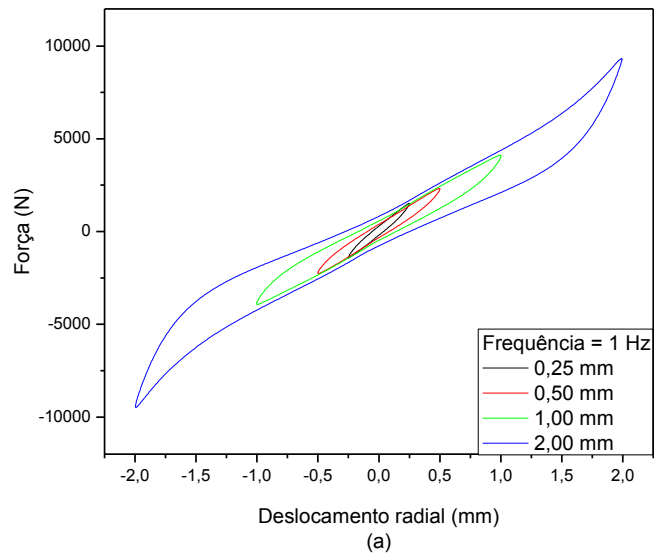


Figura 69 – Em (a) forças radiais em função dos deslocamentos de 0,25 mm, 0,50 mm, 1,00 mm e 2,00 mm para a frequência de 1 Hz e em (b) forças radiais em função do deslocamento de 0,25 mm, 0,50 mm, 1,00 mm e 2,00 mm para a frequência de 4 Hz.

A Figura 70 apresenta em (a) um gráfico da resposta em força radial em função do deslocamento de 0,25 mm, para as frequências de 1 Hz, 2 Hz, 3 Hz, e 4 Hz e em (b) um gráfico da resposta em força radial em função dos deslocamentos de 2,00 mm para a frequência de 1 Hz, 2 Hz, 3 Hz, e 4 Hz. Observa-se por meio dos gráficos apresentados que existe um aumento da força radial com o aumento da frequência. Os valores das forças radiais para o deslocamento de 0,25 mm e 2,00 mm para as frequências de 1 Hz, 2 Hz, 3 Hz, e 4 Hz são apresentados na Tabela 16.

Tabela 16 – Forças radiais para os deslocamentos de 0,25 mm e 2,00 mm para as frequências de 1 Hz, 2 Hz, 3 Hz e 4 Hz.

| Deslocamento (mm) | | 0,25 | | | |
|-------------------|---------|---------|---------|---------|--|
| Frequência (Hz) | 1 | 2 | 3 | 4 | |
| Força (N) | 1474,59 | 1524,32 | 1560,66 | 1583,61 | |
| Deslocamento (mm) | | 2,00 | | | |
| Frequência (Hz) | 1 | 2 | 3 | 4 | |
| Força (N) | 9316,22 | 9385,25 | 9439,89 | 9489,12 | |

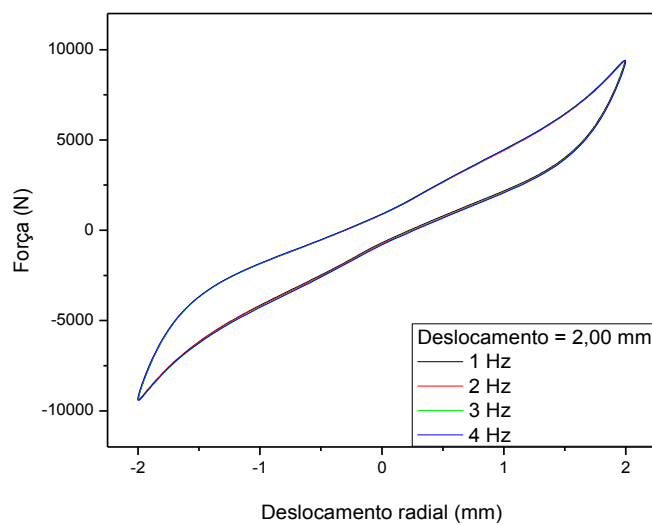
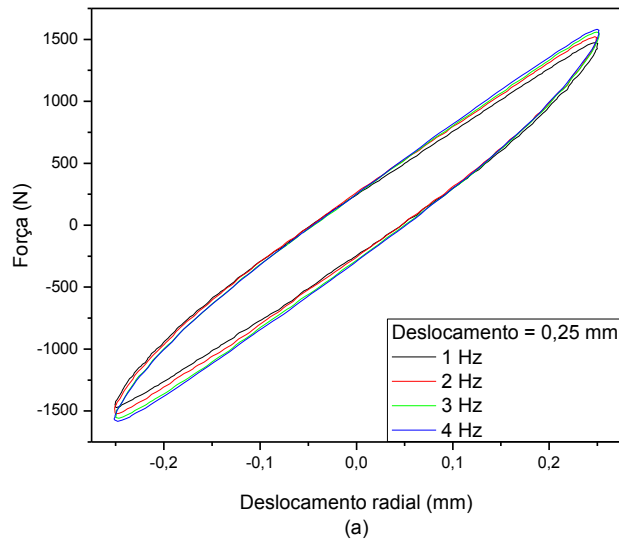


Figura 70 – Em (a) forças radiais em função dos deslocamentos de 0,25 mm para as frequências de 1 Hz, 2 Hz, 3 Hz e 4 Hz e em (b) forças radiais em função do deslocamento de 2,00 mm para as frequências de 1 Hz, 2 Hz, 3 Hz e 4 Hz.

Observou-se por meio dos gráficos apresentados que a resposta dinâmica para o modo de deformação radial para a bucha de borracha ensaiada, apresenta características lineares para deslocamentos até 1,00 mm, e não linearidades são observadas para o deslocamento de 2,00 mm. Nota-se também que houve um aumento da força radial com o aumento da taxa de deformação, fenômeno que também foi observado para o estudo realizado nesta dissertação para os ensaios estáticos para o modo de deformação radial e para os ensaios dinâmicos para o modo de deformação axial.

Verifica-se também por meio dos gráficos apresentados dos ensaios dinâmicos para o modo de deformação radial, que assim como observado para os modos de deformação axial e torcional o aumento da amplitude de deformação provocou uma diminuição do módulo dinâmico e que o aumento da frequência provocou um aumento da resposta em força e da área sob a curva de histerese.

4.1.2 Resultados dos ensaios dinâmicos para o modo de deformação axial-torcional acoplado

A partir dos resultados experimentais dos ensaios dinâmicos para o modo de deformação axial-torcional acoplado foi possível observar que a resposta em torque em função de uma rotação dinâmica imposta a bucha de borracha é significativamente afetada pela quantidade do deslocamento axial acoplado.

Para realização dos ensaios dinâmicos para o modo de deformação axial-torcional acoplado, um deslocamento axial foi imposto à luva interna da bucha de borracha a uma taxa de deformação de 500 mm/min. Esse deslocamento foi mantido constante por 600 s. Após esses 600 s uma solicitação dinâmica foi aplicada, limitou-se essa solicitação a 10 ciclos de forma a se evitar o aquecimento da bucha de borracha. Para a apresentação dos resultados é utilizado à curva de histerese do ciclo de número 10. Os ensaios foram realizados com varias combinações de deslocamentos (0,00 a 10,00 mm, com incremento de 1,00 mm) e rotações (5°, 10°, 15°, 20°, 25° e 30°). Mais detalhes sobre a metodologia experimental utilizada na realização dos ensaios dinâmicos para o modo de deformação axial-torcional acoplado é encontrada no item 3.5.2.4.

A Figura 71 apresenta o gráfico do torque dinâmico em função da rotação dinâmica de 5° para deslocamentos axiais de 0,00 a 10,00 mm. Verifica-se por meio do gráfico que à medida que se aumentou o deslocamento axial algumas mudanças nas respostas para o torque ocorreram.

Para uma faixa de deslocamento de 0,00 a 5,00 mm, a resposta em torque quase não foi influenciada, ou seja, as curvas de histerese ficaram praticamente uma sobreposta sobre as outras. Com o aumento do deslocamento axial na faixa de 6,00 a 10,00 mm, o torque aumenta significativamente, isso é observado pelo aumento da inclinação das curvas. As respostas em torque em função da rotação dinâmica de 5° para os deslocamentos axiais de 0,00 a 10,00 mm mostraram-se lineares.

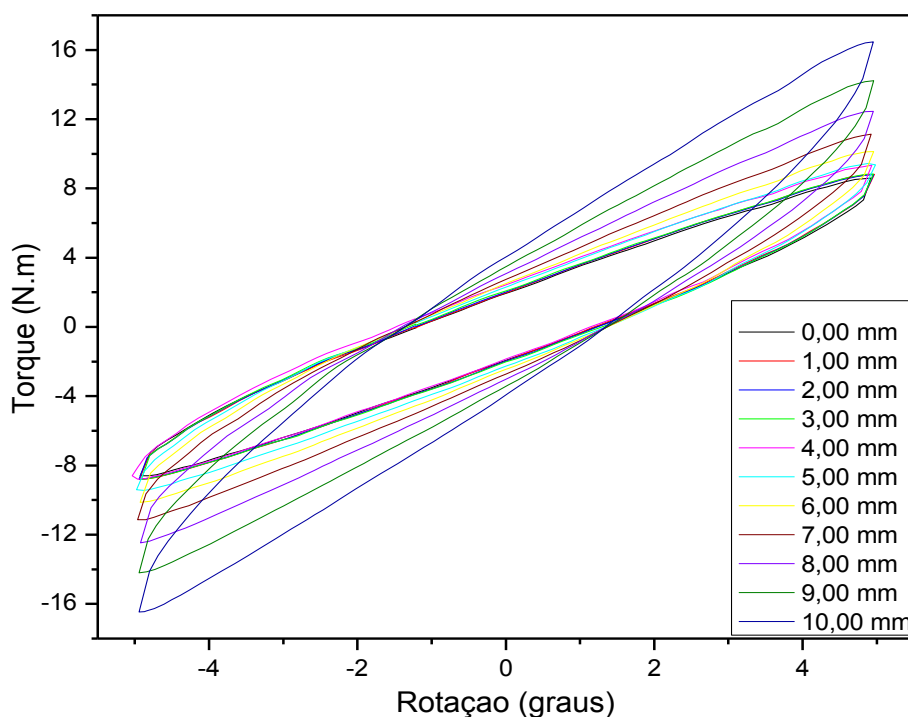


Figura 71. Torque em função do ângulo de 5° para os deslocamentos axiais.

Respostas do torque dinâmico em função da rotação dinâmica de 10° para os deslocamentos axiais de 0,00 a 10,00 mm são apresentadas na Figura 72. Observa-se por meio do gráfico que a área sob a curva, área da elipse, aumenta para deslocamentos axiais a partir de 5,00 mm.

A área da elipse corresponde à perda de energia ocasionada pela dissipação viscosa no ciclo, chamado fator de perda (*lossfactor*). Desta forma, quanto maior o fator de perda, ou seja, o quanto o material perde em calor, danos internos a sua estrutura devido às solicitações, maior será a área do loop de histerese. Conclui-se assim que o aumento do deslocamento axial, para valores maiores que 5,00 mm, aumenta a perda de energia pela dissipação viscosa no ciclo, ou seja, aumenta o fator de perda.

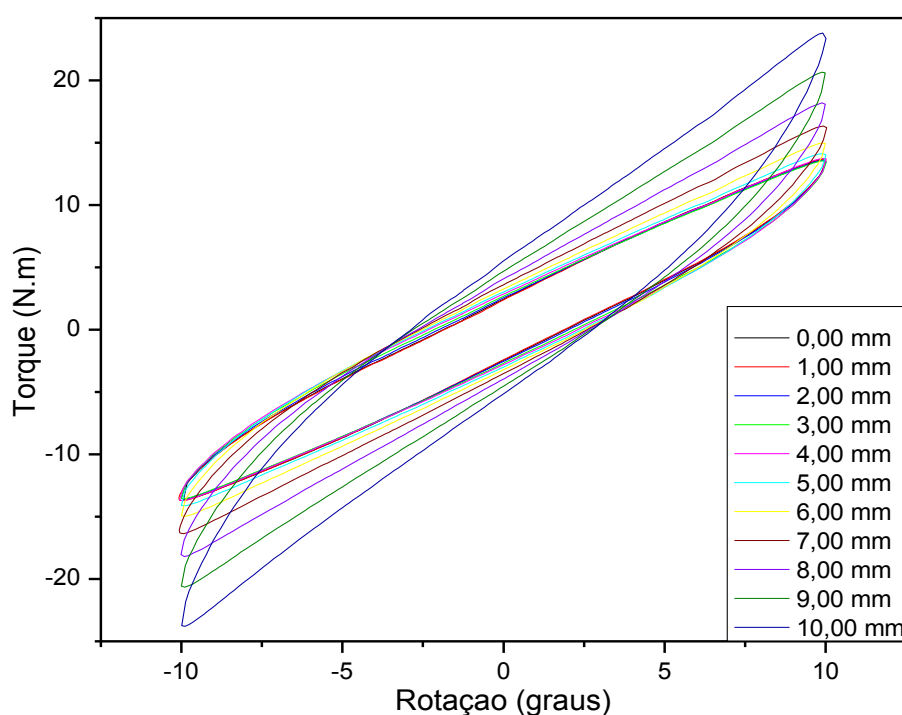


Figura 72. Torque em função do ângulo de 10° para os deslocamentos axiais.

Respostas do torque dinâmico em função da rotação dinâmica de 20° para os deslocamentos axiais de 0,00 a 10,00 mm são apresentadas na Figura 73. Observa-se que o aumento do deslocamento axial, para ângulos de rotação maiores induz a não linearidades na resposta em torque para a bucha de borracha. Esta não linearidade é uma característica dos materiais elastoméricos, e pode ser observada, pois os deslocamentos axiais começam a provocar distorções na curva de histerese, e a mesma passa de um formato de elipse para o de um S invertido.

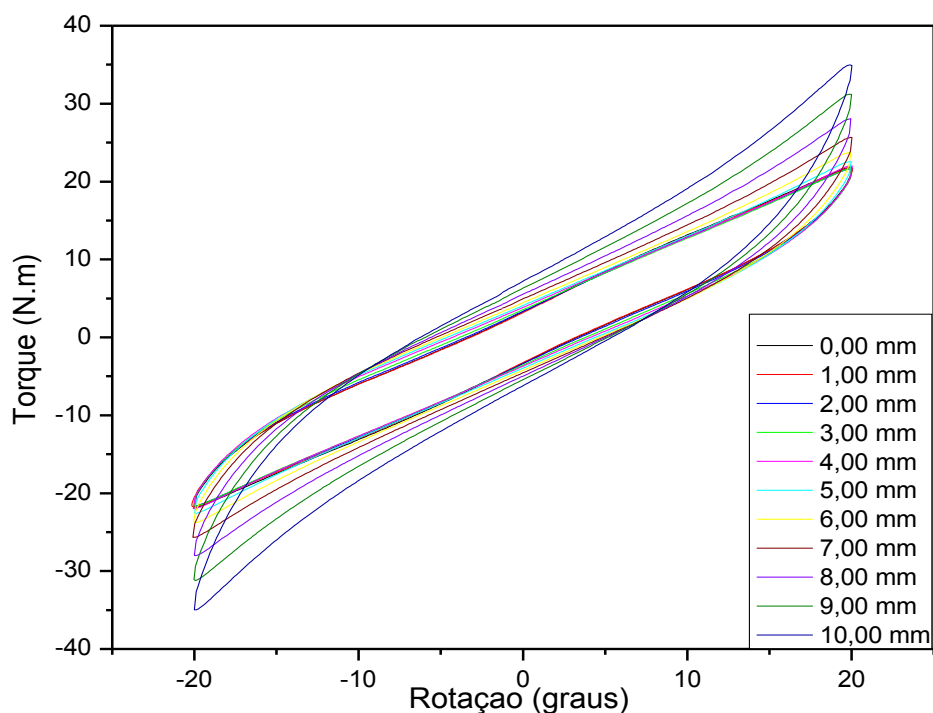


Figura 73. Torque em função do ângulo de 20° para os deslocamentos axiais.

Respostas do torque dinâmico em função da rotação dinâmica de 30° para os deslocamentos axiais de 0,00 a 10,00 mm são apresentadas na Figura 74. Observa-se por meio do gráfico que a resposta em torque em função do deslocamento axial acoplado para a rotação de 30° tem características não lineares e que essa não linearidade é maior tanto quanto for maior o deslocamento axial acoplado.

Uma característica importante observada ao se fazer uma análise das respostas em torque dinâmico em função das rotações dinâmicas para os deslocamentos de 0,00 a 10,00 mm, nos gráficos apresentados neste trabalho é que o aumento do torque dinâmico com o aumento dos deslocamentos axiais se mostrou mais pronunciado para menores ângulos de rotação impostos a luva interna da bucha de borracha do que para ângulos maiores.

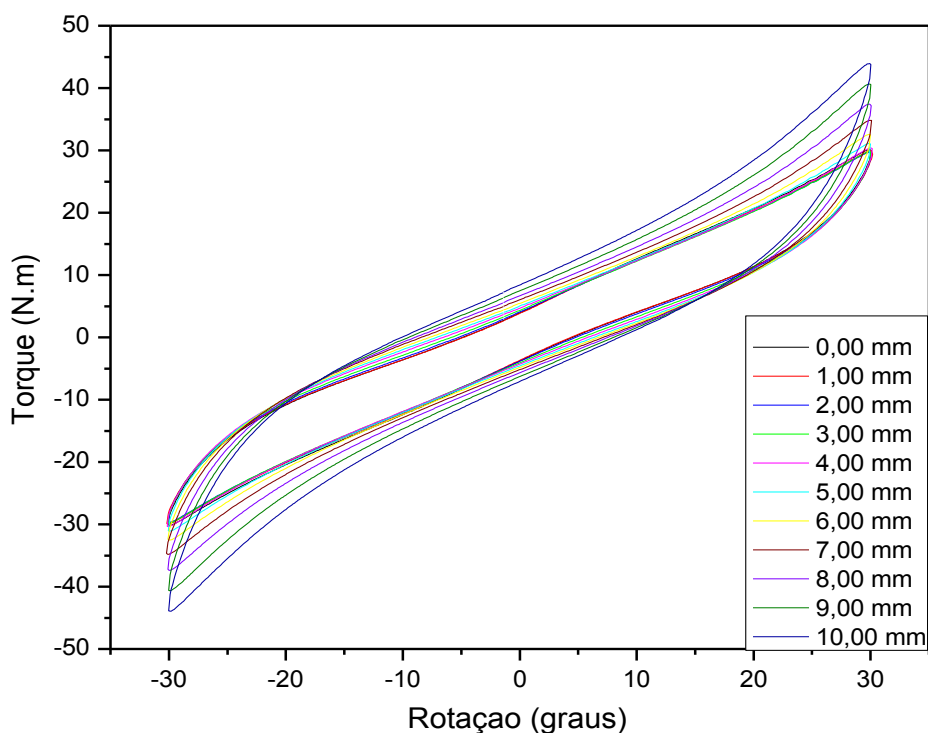


Figura 74. Torque em função do ângulo de 30° para os deslocamentos axiais.

Uma observação também importante a partir dos resultados experimentais dos ensaios realizados no modo de deformação axial-torcional acoplado, onde se impunha um deslocamento axial e um ângulo de rotação era ciclado sobre esse deslocamento axial, é que a resposta do torque significativamente aumenta para deslocamentos axiais maiores que 5,00 mm, para deslocamentos até 5,00 mm não foi observado grande influencia sobre o torque.

A Figura 75 mostra o gráfico da variação percentual do torque em função dos deslocamentos axiais de 0,00 a 10,00 mm, para as rotações dinâmicas de 5°, 10°, 20° e 30°. Analisando o gráfico podemos observar em termos de porcentagem o quanto é significativo o aumento do torque dinâmico em função do aumento do deslocamento axial imposto.

Para o deslocamento axial máximo de 10,00 mm, para a rotação dinâmica de 5°, foi observado um aumento de 91,62 % em torque. Já para o deslocamento axial máximo de 10,00 mm, para a rotação dinâmica de 30°, foi observado um aumento de 41,28 % em torque.

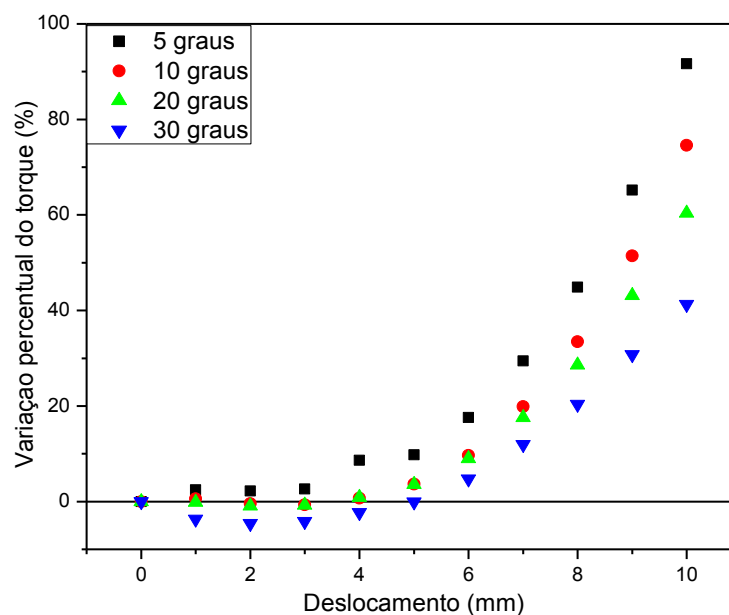


Figura 75. Variação percentual do torque em função dos deslocamentos axiais de 0,00 a 10,00 mm para as rotações

Segundo Yeoh (1993), a extensão das ligações cruzadas nas cadeias poliméricas é uma possível causa para o comportamento não linear do material em relação ao torque. O efeito observado entre deformações axiais entre 0,00 e 5,00 mm, que é pouca influencia sobre o torque, refere-se ao processo de extensão e alinhamento das ligações emaranhadas nas cadeias poliméricas até o seu limite, quando então o torque começa a aumentar. Então, a presunção de extensibilidade finita de cadeias de rede explica o comportamento da rigidez observada em deformações entre 6,00 e 10,00 mm.

O comportamento da bucha de borracha para o modo de deformação axial torcional acoplado mostrado neste trabalho é importante na prática, devido ao fato de que as buchas de borracha são solicitadas por cargas combinadas na direção axial e de torção sob condições normais de uso.

Capítulo 5

CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA PRÓXIMOS TRABALHOS

5.1 CONCLUSÕES

No presente trabalho foi avaliado por meio de ensaios estáticos e ensaios dinâmicos, para os modos de deformação axial, torcional e radial, o efeito da amplitude de deformação e da taxa de deformação nas respostas mecânicas de uma bucha de borracha comercialmente disponível. Foi avaliado também o efeito de solicitações estáticas e dinâmicas axial-torcional acopladas na resposta mecânica da bucha de borracha. A partir dos resultados destes ensaios as seguintes conclusões podem ser obtidas.

- Os dados obtidos das respostas dos ensaios estáticos para os modos de deformação axial, torcional e radial, permitem concluir que:
 - (a) O aumento da amplitude de deformação induz a não linearidades na resposta em força/torque.
 - (b) O aumento da taxa de deformação induz a respostas mais rígidas para a bucha de borracha.

- (c) As respostas a solicitações estáticas para a bucha de borracha é dependente do tempo.
- Os resultados experimentais dos ensaios estáticos para o modo de deformação axial-torcional acoplado permitem concluir que a resposta em torque em função de uma rotação imposta a bucha de borracha é significativamente afetada pela quantidade de deslocamento axial. O aumento do deslocamento axial até certo valor para um ângulo de rotação provoca uma diminuição na rigidez torcional da bucha, ou seja, o torque mínimo para o ângulo de rotação de 5 graus ocorreu com o deslocamento axial acoplado de 8,00 mm, para o ângulo de 10 graus com o deslocamento axial acoplado de 7,00 mm, para o ângulo de rotação de 20 graus com o deslocamento axial acoplado de 6,00 mm e para o ângulo de 30 graus o torque mínimo foi observado quando se tinha um deslocamento axial acoplado de 5,00 mm. Segue-se então um progressivo aumento da rigidez quando esse deslocamento aumenta para valores superiores ao apresentado acima para o torque mínimo para os respectivos ângulos.
 - Os dados obtidos das respostas dos ensaios dinâmicos para os modos de deformação axial, torcional e radial, permitem concluir que:
 - (a) O aumento da amplitude de deformação induz a não linearidades na resposta, que foi observada a partir de distorções nas curvas de histerese para os respectivos modos de deformação.
 - (b) O aumento da taxa de deformação (frequência) provocou um aumento do valor da resposta para uma mesma solicitação.
 - (c) O aumento da taxa de deformação (frequência) provocou um aumento da área sob a curva de histerese, indicando que quanto maior a taxa de deformação (frequência) maior é o dano infligido a estrutura do material.
 - Os resultados experimentais dos ensaios dinâmicos para o modo de deformação axial-torcional acoplado permitem concluir que a resposta em torque em função de uma rotação imposta a bucha de borracha é significativamente afetada pela quantidade do deslocamento axial acoplado. Para deslocamentos axiais até 5,00 mm não foi observado grande influencia na resposta em torque. Já para deslocamento entre 6,00 e 10,00 mm a resposta em torque tem um aumento considerável.

5.2 SUGESTÕES PARA PRÓXIMOS TRABALHOS

Como sugestão para próximos trabalhos tem-se:

- Avaliar experimentalmente o comportamento mecânico de buchas de borracha quando submetidas a outros modos de deformação acoplados não abordados neste trabalho. (exemplo: axial-radial; torcional-radial).
- Avaliar experimentalmente o comportamento mecânico de buchas de borracha quando submetidas a 3 modos de deformação acoplados. (exemplo: axia-torcional-radial).
- Estudar os efeitos da temperatura no comportamento mecânico de buchas de borracha, por meio de ensaios em câmaras ambientais.
- Estudar os efeitos da frequência em ensaios de fadiga e o aquecimento gerado nas buchas de borracha.
- Avaliar o efeito do aquecimento gerado no processo de fadiga por meio de análise térmica (DSC, DMA etc...)
- Fazer análises de morfologia das buchas após solicitação no limite do carregamento.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ADKINS, J. E., GENT, A. N. Load-deflexion relations of rubber bush mountings. British journal of applied physics. VOL. 5, pp. 354-358, 1954.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. D412: Standard Test Methods for Vulcanized rubber and Thermoplastic Elastomers – Tension. Philadelphia, PA: ASTM, 1997.

BILLMEYER, F. W., Textbook of Polymer Science, John Wiley & Sons, New York, 1971.

BRYDSON, J. A. Rubbery Materials and Their Compounds, Elsevier Applied Science, London, 1988, 469 p.

Brown, R., Physical Testing of Rubber. Springer Science + Business Media, 2006, 387 p.

BUSFIELD, J. J. C., Davies, C. K. L. Stiffness of simple bonded elastomer bushes Part 1 – Initial behavior. Plastics, Rubber and Composites. Vol. 30, No. 5, pp. 243-257, 2001.

CAETANO, M. J. L. A Descoberta da Vulcanização. Ciência e Tecnologia da Borracha. Disponível em: <http://www.ctb.com.pt/?page_id=514> Acesso em: 18-05-2012.

CALLISTER JR, W. D. Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução. Rio de Janeiro: LTC. 2008. 705 p. 7ª edição.

CANEVAROLO JR., S. V. Ciência dos Polímeros: Um Texto Básico para Tecnólogos e Engenheiros. São Paulo: Artliber, 2002. 280 p. 3ª edição.

CAPELLE, G. Calendering technology. In: BHOWMICK, A.N.; HALL, M.M.; BENAREY, H. A. (ED.). Rubber products manufacturing technology. New York: Marcel Dekker, 1994. Cap. 4.

CIECIELSKI, A. An Introduction to Rubber Technology. United Kingdom: Rapra technology Limited.1999. 273 p.

CIULLO, P. A.; HEWITT, N. The Rubber Formulary. Nova York: Noyes Publications, 1999. 743 p.

DOZDROV, A. D. Finite elasticity and viscoelasticity: a course in the nonlinear mechanics of solids, Massachusetts, Word scientific publishing Co. Pte. Ltd, 1996.

EIRICH, F.R. Science and Technology of Rubber. New York: Academic Press, 1978. 670 p.

EUGÊNIO, M. L. Contribuição ao desenvolvimento de uma bucha elastomérica para a bandeja inferior de um veículo compacto. 2006. 80 f. Dissertação de Mestrado (Mestrado Profissional em Engenharia Automotiva). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo.

FLETCHER, W.P., GENT, A.N. Non-linearity in the dynamic properties of vulcanized rubber compounds. I.R.I. Transactions, Vol. 29, pp. 266–280, 1953.

GAIOLFATTO, M. F. Adesão da borracha a metal no novo milênio. Materia técnica. Borracha atual, 2013. Disponível em: <http://www.borrachaatual.com.br/materiatecnica/33/materia_tecnica_33b.pdf> Acesso em: 11-01-2013.

GARBIM, V. J. Borrachas: Tecnologia, características, compostos e aplicações. Rio de Janeiro: Publit Soluções Editoriais. 2011. 526 p.

GARBIM, V. J. Molas e Coxins de Borracha – Características de construção, tipos de solicitação e montagem. CENNE, 2012. Disponível em:<http://www.cenne.com.br/wp-content/uploads/2012/05/molas_Coxins_parte_dois.pdf.>Acesso em: 10-06-2012.

GENT, A. N. Engineering with Rubber: How to Design Rubber Components. Hanser Gardner Publications Inc. 2001. 365 p.

GHELLER Jr., J.; HACKBART, F. S. Análise das Propriedades Dinâmico-Mecânicas em Compostos de Borracha. Centro Tecnológico de Polímeros SENAI CETEPO. SENAI-RS. 2007.

GRISON, E. C.; BECKER, E. J.; SARTORI, A. F. BORRACHAS E SEUS ADITIVOS: Componentes, Influências e Segredos. Porto Alegre: Suliane, 2010. 206 p.

HEIBING, B., ERSOY, M. Chassis Handbook: Fundamentals, Driving Dynamics, Components, Mechatronics, Perspectives. ATZ, 2011. 591 p.

HEMAIS, C. A. Polímeros e a Indústria Automobilística. Polímeros: Ciência e Tecnologia, vol. 13, nº 2, p. 107-114, 2003.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 1382: Rubber Vocabulary. 5a edição. 2008.

KADLOWEC, J; WINEMAN, A; Hulbert, G. Elastomer bushing response: experiments and finite element modeling. Acta Mechanica. Vol. 163 (1–2), pp. 25–38, 2003.

KADLOWEC, J; GERRARD, D; PEARLMAN, H. Coupled axial–torsional behavior of cylindrical elastomer bushings. Polymer Testing. Vol. 28, pp. 139–144, 2009.

KARLSSON, F.; PERSSON, A. Modeling Non-Linear Dynamics of Rubber Bushings - Parameter Identification and Validation. 2003. 144 f. Master's Dissertation - Division of Structural Mechanics, LTH, Lund University, Lund, Sweden.

LEE, S. B.; WINEMAN, A.A Model for Non-Linear Viscoelastic Axial Response of an Elastomeric Bushing. International Journal of Non-Linear Mechanics, Vol. 34, pp. 779-793, 1999- a.

LEE, S. B.; WINEMAN, A.A model for nonlinear viscoelastic torsional response of an elastomeric bushing. Acta Mechanica, Vol. 135, pp. 199-218, 1999 - b.

LEE, S. B.; WINEMAN, A. Model for non-linear viscoelastic coupled mode response of an elastomeric bushing. *International Journal of Non-Linear Mechanics*, Vol. 35 (2), pp. 177–199, 2000.

LEE, S. B.; SHIN, J.; WINEMAN, A. An Experimental Study of Nonlinear Viscoelastic Bushing Model for Axial Mode. *KSME International Journal*, Vol. 17, No. 9, pp. 1324- 1331, 2003.

MANO, E. B.; MENDES, L. C. *Introdução a Polímeros*. São Paulo: Edgard Blucher Ltda, 1999. 191 p.

MARK, J. E., ERMAN, B., EIRICH, F. R., *Science and Technology of Rubber*. Elsevier Academic Press, 2005. 743 p.

MULLINS, L. Softening of Rubber by Deformation. *Rubber Chemistry and Technology*, Vol. 42, pp. 339-362, 1969.

OK, J; YOO, W; SOHN, J. Development Of Nonlinear Coupled Mode Bushing Model Based On The Bouc-Wen Hysteretic Model. *Proceedings of the ASME 2007 International Design Engineering Technical Conferences & Computers and Information in Engineering Conference IDETC/CIE 2007*, September 4-7, 2007, Las Vegas, Nevada, USA, 2007 - a.

OK, J; YOO, W; SOHN, J. Experimental Study On The Bushing Characteristics Under Several Excitation Inputs For Bushing Modeling. *International Journal of Automotive Technology*, Vol. 8, No. 4, pp. 455–465, 2007 - b.

OLSSON, A.K. *Finite Element Procedures in Modelling the Dynamic Properties of Rubber*. 2007. 126 f. Doctoral Thesis - Division of Structural Mechanics, LTH, Lund University, Lund, Sweden.

PAYNE, A.R. In *Reinforcement of Elastomers*, G. Kraus. New York: Interscience, 1965.

PAYNE, A. R. Study of Carbon Black Structures in Rubber. *Rubber Chemistry and Technology*, v 38, 1965.

PECORARI, P. M. PNEUS: da borracha ao controle. São Paulo: Batista, 2007. 96 p.

TÁRRAGO, M.J. G.; KARI, L.; VINOLAS, J. Axial stiffness of carbon black filled rubber bushings including frequency and amplitude dependence. *Kautsch. Gummi Kunsts*, Vol. 60 (01/02), pp. 43–48, 2007 - a.

TÁRRAGO, M.J. G.; KARI, L.; VINOLAS, J.; Gil-Negrete, N. Torsion stiffness of a rubber bushing: a simple engineering design formula including amplitude dependence. *The Journal of Strain Analysis for Engineering Design*, Vol. 42, pp. 13–21, 2007 - b.

RIPPEL, M. M.; BRAGANÇA, F. C. Borracha natural e nanocompósitos com argila. *Química Nova*, Vol. 32, No. 3, p. 818-826, Abril 2009.

SHAEFER, R. J. Dynamic Properties of Rubber. *Rubber. World and Technology*, v.14, pág.16, jun. 1995.

VAN BEILEN, J. B.; POIRIER, Y. Establishment of new crops for the production of natural rubber. *Trends Biotechnol.* Vol. 25, pp. 522-529, 2007.

Wineman, A. S.; Van Dyke, T.; Shi, S. A Nonlinear Viscoelastic Model for one Dimensional Response of Elastomeric Bushings. *International Journal of Mechanical Sciences*. Vol. 40, pp. 1295-1305, 1998.

Yeoh, O.H. Some forms of the strain energy function for rubber. *Rubber Chemistry and Technology*. Vol. 66, pp. 754–771, 1993.