

RESSALVA

Atendendo solicitação do autor, o
texto completo desta tese será
disponibilizado somente a partir de
02/03/2022.

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
FACULDADE DE ENGENHARIA
CAMPUS DE ILHA SOLTEIRA**

JEFERSON CAMARGO FUKUSHIMA

**Caracterização Dinâmica de
Elastômeros Magneto-Reológicos**

Ilha Solteira
2021

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

JEFERSON CAMARGO FUKUSHIMA

Caracterização Dinâmica de Elastômeros Magneto-Reológicos

Tese apresentada ao Programa de Pós graduação da Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira – UNESP como parte dos requisitos para obtenção do título de doutor em Engenharia Mecânica. Área do conhecimento: Mecânica dos Sólidos.

Nome do orientador:

Prof. Dr. Amarildo Tabone Paschoalini

Ilha Solteira

2021

FICHA CATALOGRÁFICA

Desenvolvido pelo Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação

F961c Fukushima, Jeferson Camargo.
Caracterização dinâmica de elastômeros magneto-reológicos / Jeferson Camargo Fukushima. -- Ilha Solteira: [s.n.], 2021
100 f. : il.

Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira. Área de conhecimento: Mecânica dos Sólidos, 2021

Orientador: Amarildo Tabone Paschoalini
Inclui bibliografia

1. Elastômeros magneto-reológicos. 2. Desenvolvimento tecnológico de MRE. 3. Caracterização física dos MREs. 4. Sistema de campo magnético variável e sistemas de absorção de vibrações.


Raiane da Silva Santos

Supervisora Técnica de Seção
Seção Técnica de Referência, Atendimento ao usuário e Documentação
Diretoria Técnica de Biblioteca e Documentação
CRB/8 - 9999

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA TESE: Caracterização dinâmica de Elastômeros Magneto-Reológicos

AUTOR: JEFERSON CAMARGO FUKUSHIMA

ORIENTADOR: AMARILDO TABONE PASCHOALINI

Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de Doutor em ENGENHARIA MECÂNICA, área: Mecânica dos Sólidos pela Comissão Examinadora:

Prof. Dr. AMARILDO TABONE PASCHOALINI (Participação Virtual)
Departamento de Engenharia Mecânica / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira - UNESP

Prof. Dr. JOAO ANTONIO PEREIRA (Participação Virtual)
Departamento de Engenharia Mecânica / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira - UNESP

Prof. Dr. MARCIO ANTONIO BAZANI (Participação Virtual)
Departamento de Engenharia Mecânica / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira - UNESP

Prof. Dr. FELIPE SILVA BELLUCCI (Participação Virtual)
Secretaria de Empreendedorismo e Inovação / Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação - MCTI

Prof. Dr. RODRIGO BORGES SANTOS (Participação Virtual)
Departamento de Engenharia Mecânica / Universidade Federal da Grande Dourados - UFGD

A handwritten signature in blue ink, which appears to read "Amarello J. Paschoalini", is positioned above the date.

Ilha Solteira, 02 de março de 2021

DEDICO

Ao meu pai Brasileiro Yoshio Fukushima e minha mãe Sonia
Barbosa Camargo Fukushima, que me educaram e me possibilitaram
mais essa conquista, exemplos de vida fundamentais
para minha vida pessoal e profissional.

AGRADECIMENTOS

- Ao meu orientador, Professor Dr. Amarildo Tabone Paschoalini, pela amizade, credibilidade, confiança e apoio que me proporcionou tranquilidade tanto nos bons momentos quanto nas dificuldades.

- Ao professor Dr. Márcio Antônio Bazani e Dr. Fabrício Cesar Lobato de Almeida do Departamento de Engenharia Mecânica da UNESP FEIS, pela amizade, pelas discussões científicas e apoio.

- Ao Dr. Felipe Silva Bellucci, vinculado ao Ministério de Ciência Tecnologia e Inovações, pela amizade, paciência, pelo suporte científico e pelo auxílio no laboratório.

- Aos amigos Dr. Daniel Henrique de Souza Obata, a aluna de Iniciação Científica Estéfani Cardoso Aires e ao Henrique Edno Leonicini de Carvalho pelo companheirismo e pela ajuda na coleta e análise dos dados deste trabalho.

Ao CNPq Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico, pela bolsa de estudos e auxílio financeiro, que possibilitou a dedicação integral ao programa de pós graduação e a operacionalização do estudo.

Aos professores do programa de Pós-Graduação da Faculdade de Engenharia de Ilha solteira UNESP, pelo amadurecimento acadêmico e conhecimento oferecido durante a realização do curso de Doutorado.

A todos os funcionários da UNESP, que contribuíram direta ou indiretamente de alguma forma com este trabalho, o meu obrigado.

“Inventar é imaginar o que ninguém pensou; é acreditar no que ninguém jurou; é arriscar o que ninguém ousou; é realizar o que ninguém tentou. Inventar é transcender. “ **Santos Dumont**

RESUMO

Elastômeros magneto reológicos (MRE) são materiais inteligentes cujo módulo de elasticidade ou performance mecânica podem ser moduladas por um campo magnético externo. Diversos grupos de pesquisa no exterior concentram esforços no estudo da fabricação, caracterização de desempenho, modelagem e aplicação dos MREs anisotrópicos ou isotrópicos. Contudo, no Brasil há ainda poucos grupos explorando a temática, gerando conhecimento e aproximando os resultados do setor produtivo. Esta tese teve como objetivos: (i) aprimorar a metodologia de preparação de um compósito tipo MRE com variações de, no mínimo, 50% em suas propriedades mecânicas devido a aplicação de campo magnético externo; (ii) aprimorar o aparato experimental de acoplamento entre o sistema de ensaios mecânico no modo dinâmico (com variação de frequência e ciclos de estímulo) e o sistema de geração de campo magnético, com vistas a aumentar a confiabilidade e reprodutividade dos resultados; (iii) desenvolver um sistema de geração de campo elétrico com intensidade variável, entre 0,1 e 0,5 Teslas, capaz de ser acoplado ao equipamento de ensaio mecânico. A princípio, os MREs foram produzidos utilizando o método de mistura mecânica a seco dos constituintes baseada em reações do estado sólido. Serão realizadas caracterizações físicas específicas para os MREs objetivando realizar um mapeamento mais preciso das características e potencialidade do material produzido. Com a realização do Projeto, espera-se contribuir significativamente para as áreas de engenharia mecânica e ciências dos materiais, bem como aproximar mais os materiais desenvolvidos a aplicação real em sistemas de absorção de vibrações, caracterizando os MREs no modo estático e dinâmico, modelando os resultados físicos e variando o campo magnético e a frequência.

PALAVRAS-CHAVE: Elastômeros magneto-reológicos. Desenvolvimento tecnológico de MRE. Caracterização física dos MREs. Sistema de campo magnético variável e sistemas de absorção de vibrações.

ABSTRACT

Magnetic rheological elastomers (MRE) are intelligent materials whose modulus of elasticity or mechanical performance can be modulated by an external magnetic field. Several overseas research groups focus efforts on the study of manufacturing, performance characterization, modeling and application of anisotropic or isotropic MREs. However, in Brazil there are still few groups exploring the theme, generating knowledge and approximating the results of the productive sector. This thesis aims to: (i) improve the methodology of preparation of an MRE-type composite with variations of at least 50% in its mechanical properties due to the application of external magnetic field; (ii) improve the experimental coupling apparatus between the dynamic mode mechanical testing system (with frequency variation and stimulus cycles) and the magnetic field generation system, with a view to increasing the reliability and reproducibility of the results; (iii) develop a system of electric field generation with variable intensity, between 0.1 and 0.5 Tesla, capable of being coupled to the mechanical test equipment. In principle, the MREs will be produced using the dry mechanical method of compounding based on solid state reactions. Specific physical characterizations will be performed for the MREs aiming to perform a more accurate mapping of the characteristics and potentiality of the material produced. With the realization of the Project, it is expected to contribute significantly to the areas of mechanical engineering and material sciences, as well as to bring the developed materials closer to the real application in vibration absorption systems, characterizing the MREs in static and dynamic mode, modeling the physical results and varying the magnetic field and frequency.

Keywords: Magneto-rheological elastomers. Technological development of MRE. Physical characterization of MREs. Variable magnetic field System and vibration

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	- Componentes elásticos e deslizantes do deslocamento causada por tensão cisalhamento.....	22
Figura 2	- Comparação fluido dilatante, fluido pseudoplástico e fluido newtoniano.....	23
Figura 3	- Componentes elásticos e deslizantes do deslocamento causa do por tensão cisalhante.....	24
Figura 4	- Onda senoidal atrasada da taxa de cisalhamento por trás da tensão de cisalhamento.....	25
Figura 5	- Relação entre tensão de cisalhamento e tensão elástica.....	26
Figura 6	- Variação dos parâmetros viscoelástico com frequência.....	26
Figura 7	- Relação entre módulo de cisalhamento e módulo de elasticidade.....	27
Figura 8	- Amostra diamagnética.....	31
Figura 9	- Paramagnético.....	32
Figura 10	- Comportamento ferromagnético.....	33
Figura 11	- Comportamento ferrimagnetismo.....	34
Figura 12	- Antiferromagnetismo.....	35
Figura 13	- Efeito do campo magnético em uma haste de elastômero magneto reológico.....	38
Figura 14	- Estrutura do ferro carbonila.....	42
Figura 15	- Propriedades Viscoelásticas do material.....	43
Figura 16	- Efeito magnetostrição em MREs sob campo magnético externo.....	46
Figura 17	- SEM (200 X) com partículas em alinhamento nas amostras de MRE com 21 phr, a seta indica o sentido do campo magnético durante a cura. a) MRE b) Spray pulverizado no MRE e c) Levemente agitada MRE.....	47
Figura 18	- Figura esquemática da construção de Tian 2018.....	49
Figura 19	- Movimento do MRE.....	49
Figura 20	- Corpo de prova.....	50
Figura 21	- Função Seno e Cosseno, funções dependentes do tempo, para material ideal viscoso.....	52
Figura 22	- Diagrama carga deformação em regime dinâmico (histerese dinâmica)	53
Figura 23	- Relação conectando tensões e deformações de três grupos de materiais, (a) Perfeitamente elástico, (b) Puramente viscoso e (c) Viscoelástico.....	54
Figura 24	- Ilustração da fase entre as funções senoidais de força e deslocamento através do tempo.....	55
Figura 25	- Histerese dinâmica.....	56
Figura 26	- Representação dos módulos através de vetores.....	57
Figura 27	- Esquema de construção.....	60
Figura 28	- Construção e montagem da bancada de ensaio.....	61
Figura 29	- Bancada Experimental.....	61
Figura 30	- Desenho técnico do aparato eletroímã.....	63
Figura 31	- Figura representativa do aparato ensaiado.....	64

Figura 32	- Foto eletroímã.....	65
Figura 33	- Imagem da montagem eletroímã mais shaker, utilizando proximetro.....	65
Figura 34	- Imagem da montagem eletroímã mais shaker utilizando acelerômetro.....	66
Figura 35	- Loops de histerese de tensão de cisalhamento versus deformação de cisalhamento para 18% sob várias densidades de fluxo magnético a 50Hz.....	68
Figura 36	- Ângulo de fase, 18% a 50Hz.....	69
Figura 37	- Loops de histerese de tensão de cisalhamento versus deformação de cisalhamento para 18% sob várias densidades de fluxo magnético a 100Hz.....	70
Figura 38	- Ângulo de fase, 18% a 100Hz.....	71
Figura 39	- Loops de histerese de tensão de cisalhamento versus deformação de cisalhamento para 33% sob várias densidades de fluxo magnético a 50Hz.....	72
Figura 40	- Ângulo de fase, 33% a 50Hz.....	73
Figura 41	- Loops de histerese de tensão de cisalhamento versus deformação de cisalhamento para 33% sob várias densidades de fluxo magnético a 100Hz.....	74
Figura 42	- Ângulo de fase, 33% a 100Hz.....	75
Figura 43	- Loops de histerese de tensão de cisalhamento versus deformação de cisalhamento para 48% sob várias densidades de fluxo magnético a 50Hz.....	76
Figura 44	- Ângulo de fase, 48% a 50Hz.....	77
Figura 45	- Loops de histerese de tensão de cisalhamento versus deformação de cisalhamento para 48% sob várias densidades de fluxo magnético a 100Hz.....	78
Figura 46	- Ângulo de fase, 48% a 100Hz.....	79
Figura 47	- Loops de histerese de tensão de cisalhamento versus deformação de cisalhamento para 18% sob densidade de 0,0T e 0,5T de fluxo magnético e várias frequências.....	80
Figura 48	- Loops de histerese de tensão de cisalhamento versus deformação de cisalhamento para 33% sob densidade de 0,0T e 0,5T de fluxo magnético e várias frequências.....	81
Figura 49	- Loops de histerese de tensão de cisalhamento versus deformação de cisalhamento para 48% sob densidade de 0,0T e 0,5T de fluxo magnético e várias frequências.....	82
Figura 50	- Loops de módulos de elasticidade versus deformação de cisalhamento para 18% sob densidade de 0,0T; 0,1T; 0,2T; 0,3T; 0,4T e 0,5T em frequência de 50Hz.....	83
Figura 51	- Loops de módulos de elasticidade versus deformação de cisalhamento para 33% sob densidade de 0,0T, 0,1T, 0,2T, 0,3T, 0,4T e 0,5T; em uma frequência de 50Hz.....	84
Figura 52	- Loops de módulos de elasticidade versus deformação de cisalhamento para 48% sob densidade de 0,0T, 0,1T, 0,2T, 0,3T, 0,4T e 0,5T; em uma frequência de 50Hz.....	85
Figura 53	- Loops de histerese de tensão de cisalhamento versus deformação de cisalhamento para 33% sem campo magnético, sob várias frequências.....	86

Figura 54	- Loops de histerese de tensão de cisalhamento versus deformação de cisalhamento para 33% com 0,1T de campo magnético sob várias frequências.....	87
Figura 55	- Loops de histerese de tensão de cisalhamento versus deformação de cisalhamento para 33% com 0,2T de campo magnético sob várias frequências.....	88
Figura 56	- Loops de histerese de tensão de cisalhamento versus deformação de cisalhamento para 33% com 0,3T de campo magnético sob várias frequências.....	89
Figura 57	- Loops de histerese de tensão de cisalhamento versus deformação de cisalhamento para 33% com 0,4T de campo magnético sob várias frequências.....	90
Figura 58	- Loops de histerese de tensão de cisalhamento versus deformação de cisalhamento para 33% com 0,5T de campo magnético sob várias frequências.....	91
Figura 59	- Visualização do módulo de cisalhamento e amortecimento de 33%.....	92
Figura 60	- Comparação do percentual do módulo de cisalhamento.....	93
Figura 61	- Comparação do percentual do módulo de amortecimento.....	94
Figura 62	- Módulo de cisalhamento e módulo de amortecimento pelo campo magnético.....	95

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	- Concentração de ferro carbonila no silicone.....	15
Tabela 2	- Bandas de infravermelho característicos de compostos de silício.....	25

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

A	Área de cisalhamento
FTIR	Espectroscopia Infravermelha por Transformada de Fourier
MRE	Elastômero Magneto-Reológico
SE	Elétrons Secundários
VE	Visco elástico
H	Espessura do elastômero no corpo de prova
F	Força
G^*	Módulo de cisalhamento complexo
G'	Módulo de elasticidade
G''	Módulo de perda
η	Viscosidade
L_m	Deformação estática
L_a	Amplitude do deslocamento
φ	Ângulo de fase
λ	Magnetostrição
λ_s	Magnetostrição de saturação
$\emptyset$	Ângulo entre os vetores M_s
ω	Velocidade angular
t	Tempo
M	Magnetização
M_s	Magnetização de saturação
μ_0	Constante magnética
θ	Ângulo entre a linha que conecta os dois dipolos e a direção da magnetização
F_m	Pré carga
F_a	Amplitude de força

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	15
2	REVISÃO DE LITERATURA.....	20
2.1	REOLOGIA.....	20
2.2	VISCOSIDADE.....	21
2.3	VISCOELASTICIDADE.....	24
2.4	POLÍMEROS.....	28
2.5	FERRO FLUIDOS.....	28
2.6	FLUIDOS MAGNETO REOLÓGICOS.....	29
2.7	FUNDAMENTOS DO MAGNETISMO.....	30
2.8	CLASSES DE MATERIAIS MAGNÉTICOS	30
2.9	ANISOTROPIA MAGNÉTICA.....	36
2.10	TEORIA DO DOMÍNIO.....	37
2.11	MAGNETOSTRICÇÃO.....	37
2.12	LIMITE DE PERCOLAÇÃO.....	40
3	MATERIAL E AMOSTRAS.....	41
3.1	O EFEITO MAGNETO-REOLÓGICOS	42
3.2	CLASSIFICAÇÃO DOS ELASTÔMEROS MAGNETO-REOLOGICOS.....	43
3.3	PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS.....	48
4	CARACTERIZAÇÃO MAGNETO REOLÓGICA.....	52
4.1	RIGIDEZ DINÂMICA E ÂNGULO DE FASE	52
4.2	MONTAGEM DO APARATO EXPERIMENTAL DE AQUISIÇÃO DA TENSÃO DE CISALHAMENTO x DESLOCAMENTO.....	60
4.3	SISTEMAS DE ANÁLISE.....	62
4.4	O SISTEMA DE MONITORAMENTO DE VIBRAÇÃO.....	62
4.5	ESQUEMA DO ELETROÍMÃ UTILIZADO NO MRE.....	63
4.6	APROFUNDANDO ENSAIOS, PERCORRENDO VÁRIAS	

	FREQUÊNCIAS.....	66
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	67
5.1	ENSAIOS DE CISALHAMENTO.....	67
5.2	RESULTADOS DOS MÓDULOS DE ELASTICIDADE.....	82
5.3	RESULTADOS PARA A CONFIGURAÇÃO DE 33% PARA FREQUÊNCIAS ENTRE 5HZ ATÉ 100HZ.....	86
6	CONCLUSÃO.....	95
	REFERÊNCIAS.....	96

1 INTRODUÇÃO

Elastômeros magneto-reológicos (MREs) são materiais inteligentes compostos de uma matriz elastomérica preenchida com partículas magnéticas. As características visco elásticas da matriz, combinada com as propriedades magnéticas das partículas permitem compostos flexíveis para se deformarem em resposta a um campo magnético aplicado externamente. A resposta rápida, o alto nível de deformações e a possibilidade de controlar essas deformações, ajustando o campo, tornam esses materiais de interesse especial na engenharia atual (PÖSSINGER, 2015). Devido às suas propriedades únicas, uma variedade de aplicações em estruturas inteligentes baseadas em MREs podem ser previstas: atuadores, sensores inteligentes, músculos artificiais, controle de som, controle de forma, produtos de monitoramento da saúde, etc. (HARVEY, 2006). No entanto, nenhuma caracterização completa das propriedades magneto-mecânicas para deformações finitas e altos campos foi realizada até agora, assim como seu comportamento em uma variação de frequências, limitando assim a concepção eficiente de tais dispositivos.

Neste capítulo, depois de introduzir os MREs e onde eles estão entre os materiais inteligentes, uma breve introdução à Reologia é proposta na Seção 2.1 e as principais características dos materiais, que poderemos observar nos resultados estão descritos no comportamento da Viscosidade e da Viscoelasticidade e dos Polímeros, são apresentados na Seção 2.2, 2.3, e 2.4. Em seguida, os fenômenos físicos envolvidos no comportamento das MREs são discutidos em mais detalhes na Seção 2.5 a 2.6, a partir de aspectos gerais do comportamento de compósitos para o comportamento de MREs sob campo magnético. Em seguida, analisamos brevemente as diferentes abordagens do campo magnético na Seção 2.7, 2.8 e 2.9. A última abordagem é a base teórica para os desenvolvimentos feitos nesta tese e requer uma caracterização experimental cuidadosa das propriedades dos materiais magneto elásticos. Portanto, também analisamos o que foi feito anteriormente experimentalmente sobre este tópico na Seção 2.10, 2.11 e 2.12 Finalmente, o escopo do presente trabalho é apresentado e a organização do manuscrito é detalhado para guiar o leitor.

Estímulos diferentes fazem com que alguns materiais chamados, “inteligentes” ou “ativos” respondam ao seu ambiente de forma reversível, produzindo assim um efeito útil. Materiais comuns que formalmente têm o rótulo de serem inteligentes incluem piezo elétricos, electro restritivos, magneto restritivos, electro reológicos.

As forças motrizes aplicadas para materiais inteligentes podem ser amplamente identificadas como campos mecânicos, campos elétricos, campos magnéticos e campos térmicos. Portanto, uma característica importante relacionada aos materiais inteligentes é que eles abrangem quase todos os campos da ciência e engenharia.

Enquanto os materiais eletroativos geralmente requerem altas voltagens para ativação, campos magnéticos gerados (ímãs permanentes, solenoides) podem ser usados para estimular materiais magneto-ativos. Como um ramo deste tipo de materiais ativos, materiais eletro e magneto-reológicos consistem de um material isolante ou uma matriz não magnética (um fluido, uma espuma ou um elastômero) em que elétrica ou magneticamente partículas polarizáveis são misturadas, respectivamente (HARVEY, 2006).

O primeiro explorado (RABINOW, 1948) e os materiais magneto-reológicos mais comuns (MR) tem uma matriz fluida. Nestes fluidos MR, a interação entre dipolos, induzida por um campo magnético externo, faz com que as partículas formem estruturas colunares paralelas para o campo aplicado uniaxialmente. À medida que o campo magnético externo aumenta, energia mecânica necessária para produzir essas estruturas de cadeia aumenta desde que se torna cada vez mais difícil para o fluido fluir através dessas estruturas formadas.

A rigidez dependente do campo obtido, que pode ser controlado de forma rápida e reversivelmente, foi explorada em uma variedade de controle de vibração ou dispositivos de transferência de torque (CARLSON, 2001) No entanto, a desvantagem dos fluidos MR é o assentamento de suas partículas e o fato de que os dispositivos precisam ser fechados. Como solução para isso, espumas magneto reológico foram desenvolvidas, em que o fluido controlável está contido numa matriz porosa absorvente. Fluidos nesses dispositivos inteligentes são, portanto, mais resistentes ao assentamento gravitacional. Além disso, não são necessárias vedações ou retentores e menor quantidade de fluido é necessária (CARLSON, 2000).

Uma resposta definitiva para o assentamento de partículas foi o uso de um elastômero como matriz. As partículas magnéticas são misturadas na mistura de polímero tipo fluido, mas permanecem fixos no lugar dentro da rede reticulada do elastômero curado. Assim, estes materiais compósitos são frequentemente considerados como análogos sólidos de compostos fluido magneto-reológicos. Os primeiros pesquisadores que realizaram testes preliminares nesses chamados Elastômeros magneto-reológicos são Rigbi e Jilken (1983). Eles estudaram o comportamento de um composto de elastômero de ferrite sob a influência combinada de mudança tensões elásticas e campos magnéticos e descreveu os efeitos magneto mecânico anteriormente desconhecidos.

Sujeitos a um campo magnético, o módulo de elasticidade e o módulo de cisalhamento dos MREs aumentam. Este fenômeno de enrijecimento induzido pelo campo é muitas vezes referido como o efeito magneto-reológico. Um grande número de experiências foi realizado para estudar o efeito magneto-reológico em elastômeros (ZHOU, 2003; VARGA, 2006). As experiências mostraram também que a variação de rigidez também depende da amplitude e da frequência da tensão (STEPANOV, 2007) e a fração de volume das partículas (NIKITIN, 2006).

Se campos magnéticos são aplicados ao compósito de elastômero durante o processamento, propriedades anisotrópicas podem ser transmitidas a esses materiais. Eles são então chamados MREs estruturados em campo e tem sido observado que eles são anisotrópicos em termos de propriedades mecânicas, magnéticas, elétricas e térmicas (CARLSON, 2000). Mais particularmente, um campo magnético uni axial aplicado produz estruturas de partículas semelhantes a uma cadeia, as partículas inicialmente formam cadeias que lentamente se fundem em colunas, enquanto em altas concentrações a morfologia torna-se ligeiramente mais complexas, com possível ramificação entre colunas e uma ligeira perda em anisotropia (MARTIN, 1998; BOCZKOWSKA, 2012). Um campo biaxial (por exemplo, rotativo) produz estruturas de partículas (MARTIN, 2000). Finalmente, com a geração de campos magnéticos triaxiais durante o processamento, uma variedade de estruturas de partículas isotrópicas e anisotrópicas pode ser criado (MARTIN, 2004).

Os MREs podem ainda ser classificadas de acordo com seus principais constituintes, ou seja, os de matriz não magnéticos e as de partículas de carga magnética, bem como as suas propriedades inerentes. Eles geralmente são compostos de uma matriz sólida, eletricamente isolante, como borracha silicone, borracha natural, poliuretano ou elastômeros termoplásticos (KALLIO, 2005; HU, 2005; CHEN, 2007). De fato, uma grande variedade de materiais matriciais cobrindo gamas de propriedades, resistência à tração ou viscosidade pode ser encontrada no mercado e na literatura. Em todos esses materiais, no entanto, os MREs em borracha de silicone desfrutaram de muita popularidade devido à sua excelente processabilidade, para o bom compromisso entre propriedades mecânicas, térmicas e de envelhecimento, bem quanto à sua ampla utilização em aplicações industriais. Além disso, possuem uma matriz com baixo módulo de elasticidade, e tendem a facilitar a interação magneto-mecânica (KALLIO, 2005; SCHUBERT, 2014). Vamos notar também que a classe individual de "elastômeros magneto-reológicos moles" foi reivindicada, que abrange MREs cuja matriz é elasticamente suave. Esta classe inclui magnético géis constituídos por partículas magnéticas dispersas numa matriz polimérica do tipo gel. As características do gel (fluido dentro de uma rede tridimensional com ligações cruzadas fracas) podem ser muito mais suaves que os elastômeros clássicos. No entanto, eles geralmente têm uma consistência pegajosa e molhada, e quando agitados, estes materiais começam a fluir (tixotropia), resultando assim em propriedades mecânicas pobres (ZRINYI, 1997; ZUBAREV, 2012).

Considerando a grande quantidade de combinações da matriz-preenchimento na literatura, muitos dos primeiros experimentos, mas também as pesquisas atuais foram dedicadas para a composição e processamento de MREs juntamente com a investigação das microestruturas por microscopia ótica, microscopia eletrônica de varredura ou micro tomografia de raios-X. As condições de processamento e os mecanismos de cura (de campo) são parâmetros cruciais para a fabricação em laboratório. Mais especificamente, a viscosidade mista - uma medida da espessura dos constituintes compostos misturados, a temperatura e o campo magnético serão determinantes considerando o tempo de sedimentação gravitacional e o alinhamento das partículas durante a cura (ALSHUTH, 2007; GÜNTHER, 2012). A estrutura final

do MRE é, portanto, específico para cada um desses parâmetros, o que dificulta a comparação de resultados na literatura.

Os objetivos específicos desta pesquisa estão listados a seguir:

- Aprimorar metodologia para a preparação de MREs isotrópicos a base de elastômeros de borracha de silicone com diversas concentrações de partículas magnéticas de ferro carbonila;
- Desenvolver um aparato experimental instrumentado para aplicação de carregamento cíclico no MRE com diferentes frequências e medição da aceleração, deslocamento e força.
- Desenvolver um sistema de variação do campo magnético (eletro ímã), entre 0 a 0,5 Tesla, para ser acoplado ao sistema de caracterização mecânico-magnético, visando avaliar o efeito do campo magnético sobre a resposta mecânico-magnética dos MREs, uma vez que o campo é um parâmetro relevante para aplicações reais e os elastômeros são sensivelmente afetados por esta variação.

REFERÊNCIAS

- ALSHUTH, T.; RAMSPECK M; SCHUSTER, R. H.; HALBEDEL B.; ZSCHUNK, F. Magnetorheologische elastomere: einfluss der partikelausrichtung auf die schaltbarkeit. **Kautschuk Gummi Kunststoffe**, Germany, v. 60, n. 9, p. 448–455, 2007.
- BAILEY, T.; UBBARD JUNIOR, J. E. Distributed Piezoelectric-Polymer Active Vibration Control of a Cantilever Beam. **Journal of Guidance, Control, and Dynamics**, United States, v. 8, n. 5, p. 605, 1985.
- BELLANDER M. **Plasticity of memory functioning: genetic predictors and brain changes**. 2016. 56 f. Thesis (Doutorado)- Karolinska Institutet, Estocolmo, Sweden, 2016.
- BOCZKOWSKA, A., AWIETJAN S. Microstructure and Properties of Magnetorheological Elastomers. **Advanced Elastomers - Technology, Properties and Applications**, n. 6, p. 147–180, 2012. DOI: 10.5772/50430.
- SCHUMANN M.; BORIN D. Y.; MORICH J.; ODENBACH S.; Reversible and non-reversible motion of NdFeB-particles in magnetorheological elastomers. **Journal of Intelligent Material Systems and Structures**, New York, v. 32, n 1, p. 3-15, 2020.
- CARVALHO, H. E. L. **Caracterização de um material magneto reológico para amortecimento semiativo de vibrações em estruturas**. 2019. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil)– Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”- UNESP, Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, 2020.
- CHUNG, D. D. L. Functional materials: electrical, dielectric, electromagnetic, optical and magnetic applications. **World Scientific**, London, v. 2, n. 1, p. 346, 2010.
- CHEN, L.; GONG, X. L.; JIANG, W. Q.; YAO, J. J.; DENG, H. X.; LI, W. H. Investigation on magnetorheological elastomers based on natural rubber. **Journal of Materials Science**, Switzerland, v. 42, n. 2, p. 5483–5489, 2007.
- CHEN, C. W. Magnetism and metallurgy of soft magnetic materials. **Dover Publications**, New York, v. 1, n 1, p. 592, 2011.
- CHRISTENSEN, K. **Percolation Theory**. United Kingdom: Blackett Laboratory, 2002.
- DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG. **DIN 53513**: Determination of the viscoelastic properties of elastomers on exposure to forced vibration at non-resonant frequencies [S.l.: s.n.] 1990.
- FLOWER, W. C. Updating a 30-year-old concept in vibration control international truck and bus meeting and exposition. **Warrendale: Society of Automotive Engineers**, Winston, v. 14, p. 56 – 70, 1995.

GÜNTHER, D.; BORIN, D.Y.; GÜNTHER, S., ODENBACH, S. X-ray microtomographic characterization of field-structured magnetorheological elastomers. **Smart Materials and Structures**, California, v. 21, n. 015005, p. 1-7, 2012.

GADE, S.; KAVERI, K.; KOSTATIN-HASEN, H.; HERLUFSEN, H. Complex modulus and damping measurements using resonant and non-resonant methods. **Noise and Vibration Conference and Exposition**, Michigan, v.2, n.4, p. 1-5, 1995.

HARVEY, J. A. Smart materials. In: AUTOR. **Mechanical engineers handbook**. 3. ed. Rio de Janeiro: Mcgraw Hill book company, 2006.

HECK, C. **Magnetic materials and their applications**. Amsterdam: Elsevier, 1974.

HILZINGER, R.; RODEWALD, W. **Magnetic materials**. Reino Unido: Publicis, 2013.

HU, Y.; WANG Y. L.; GONG, X. L.; GONG, X. Q.; ZHANG, X. Z.; JIANG, W. Q.; ZHANG, P. Q.; CHEN, Z.Y. New magnetorheological elastomers based on polyurethane/si-rubber hybrid. **Polymer Testing**, Amsterdam, v. 24, n. 3, p. 324–329, 2005.

KCHIT, N. *et al.* Mechanical and electrical properties of magnetorheological elastomers in relation with percolating microstructures. **Hal Archives-ouvertes**, Paris, v. 20, n. 204136, p. 1-3, 2013.

KALLIO, M. **The elastic and damping properties of magnetorheological elastomers**. 2005. Thesis (PhD)- Tampere University of Technology, Finlândia 2005.

LIPATOV, Y. S. Polymer Reinforcement. 2. ed. Ukraine: Chem.Tec. Publishing, 1995.

LI, W. H.; ZHANG, X. Z. Research and applications of mr elastomers. **Recent Patents on Mechanical Engineering**, China, v. 1, n. 3, p. 161–166, 2008.

LI D. D.; et al. Modeling the response of magnetorheological fluid dampers under seismic conditions. **Applied Sciences**, Basel, v. 9, p. 1-16, 2019.

LIGIA, G; DEODATO, R. **Physicochemical behavior and supramolecular organization of polymers**. Netherlands: Springer Netherlands, 2009.

PREMA, K. H. **Magnetic dielectric and pbysicomechanical properties of rubber ferrite nanocomposites**. 2007. Thesis (PhD)- Department of Polymer Science and Rubber Technology, Cochin University of Science and Technology, India, 2007.

MAZDA, F. F. **Electronics engineer's reference book**. 6. ed. Reino Unido: Butterworth-Heinemann, 1989.

MARTIN, J. E; VENTURINI, E.; GULLEY, G. L.; WILLIAMSON, J. Using triaxial magnetic fields to create high susceptibility particle composites. **Physical Review E**, London, v. 69, n. 021508, p. 1–15, 2004.

MARTIN, J. E.; VENTURINI, E.; ODINEK, J.; ANDERSON, R. A. Anisotropic magnetism in field-structured composites. **Physical Review E**, London, v. 61, n. 3, p. 2818–2830, 2000.

MARTIN, J. E.; ANDERSON, R. A. ; TIGGES, C. P. Simulation of the athermal coarsening of composites structured by a uniaxial field. **Journal of Chemical Physics**, v. 108, n. 9 p. 3765–3787, 1998.

MITTAL, K. L.; PIZZI, A. **Handbook of sealant technology**. 2. ed. New York: Crc Press, 2010.

Mezger T. G. **The rheology handbook**. 4. ed. London: Library Vincentz Network, 2014.

MIETTA, J. L; TAMBORENEA P. I; Negri R. M. Anisotropic reversible piezoresistivity in magnetic–metallic/polymer structured elastomeric composites: modelling and experiments. **Soft Matter**, London, v. 28, n. 1, p. 6985, 2016.

MORTON, M. **Rubber tecnology**. 6. ed. London: Chapman & Hall, 1966.

NIKITIN, L. V.; Korolev, D. G.; Stepanov, G. V.; Mironova, L. S. Experimental study of magnetoelastics. **Journal of Magnetism and Magnetic Materials**, v. 300 n. 16, p. 234-238, 2006.

VOIGTMANN, T. *et al.* Rheology of colloidal and metallic glass formers. **Colloid and Polymer Science**, v. 24, n.298, p. 681-696, 2020.

PÖSSINGER, T. **Experimental characterization, modeling and simulation of magneto- rheological elastomers**. 2015. 180 f. Thesis (PhD)- Engineering Sciences [physics], Ecole Polytechnique, Paris, 2015.

RABINOW, J. The magnetic fluid clutch. **Transactions of the American Institute of Electrical Engineers**, Boston, v. 67, n. 2, p. 1308-1315, 1948.

RIGBI, Z.; JILKEN, L. The response of an elastomer filled with soft ferrite to mechanical and magnetic influences. **Journal of Magnetism and Magnetic Materials**, North Holland, v. 37, n. 2, p. 267–276, 1983.

ROSSI, D.; CARPI, F.; MAZZOLDI, A. **Soft actuators – aiming at realizations of artificial muscles**. Chicago: NTS, 2004.

SHENG, P.; ANNU, W. Electrorheological Fluids: mechanisms, dynamics, and microfluidics applications. **Annual Review of Fluid Mech**, Collen Campbell, v. 44, n. 2, p.143-174, 2012.

SPALDIN, N. A. **Magnetic materials: fundamentals and device applications**. 2. ed. Cambridge: University Press, 2003.

SCHERER, C.; FIGUEIREDO NETO, A. M. Ferrofluids: Properties and Applications. **Brazilian Journal of Physics**, v. 35, n. 3A, p. 718-727, 2005.

SCHUBERT, G. **Manufacture, characterisation and modelling of magnetorheological elastomers**. 2014. Thesis (PhD)- University of Glasgow, Glasgow, 2014.

STEPANOV, G. V.; ABRAMCHUK, S. S.; GRISHIN, D. A.; NIKITIN, L. V.; KRAMARENKO, E. Y.; KHOKHLOV, A. R. Effect of a homogeneous magnetic field on the viscoelastic behavior of magnetic elastomers. **Polymer**, Warren, v. 48, n. 1, p. 488-495, 2007.

VARGA, Z.; FILIPCSEI, G.; ZRÍNYI, M. Magnetic field sensitive functional elastomers with tunable elastic modulus. **Polymer**, Warren, v. 47, n. 4, p. 227-233, 2006.

WANG, H.; LIAO, W. H. Magnetorheological fluid dampers: A review of parametric modelling. **Smart Mater. Struct.**, California, v. 20, n. 023001, p. 1-4, 2011.

WASHINGTON D. C. **Polymer matrix composites guidelines for characterization of structural materials**. Washington: Department of Defense, 2002.

WILEY, J. **Handbook of magnetism and advanced magnetic materials**. 2. ed. France: Novel Materials, 2007.

XULIMENG, Z.; TIAN, Y. Y. Tailoring magnetic, mechanical and dielectric properties of magnetorheological elastomers based on natural rubber and iron by magnetic field assisted curing for possible applications. **Smart Mater. Struct.**, California, v. 19, n. 2, p. 964, 2010.

XIE, T. Recent advances in polymer shape memory. **Polymer**, Warren, v. 52, n. 22, p. 4985-5000, 2011.

TIAN, T.; NAKANO, M. Fabrication and characterisation of anisotropic magnetorheological elastomer with 45_ iron particle alignment at various silicone oil concentrations. **Journal of Intelligent Material Systems and Structures**, London, v. 29, n. 2, p. 151–159, 2018.

ZRINYI, M.; BARSÍ, L.; BÜKI A. Ferrogel: a new magneto-controlled elastic medium. **Polymer Gels and Networks**, Boca Raton, v. 5, n. 6, p. 415–427, 1997.

ZHOU, G. Shear properties of a magnetorheological elastomer. **Smart Mater. Struct.**, California, v. 12, n. 6, p. 139-146, 2003.

ZUBAREV, A. Y. On the theory of the magnetic deformation of ferrogels. **Soft Matter**, London, v. 8, n. 11, p. 3174–3179, 2012.