

**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
Diretora Técnica de Biblioteca e Documentação
CRB8 - 9999



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

Câmpus de Ilha Solteira

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

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 desfrutam 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.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 REOLOGIA

A palavra "Rheo" é uma palavra grega que significa fluxo e "Ology" significa estudo. Os cientistas que estudam as propriedades dos fluidos não newtonianos são chamados de reologistas.

Reologia é o estudo do fluxo ou deformação da matéria não particularmente no estado líquido, mas também no caso de sólidos maciços e sólidos na região de fluxo de plástico e outros materiais similares conhecidos como matéria macia. As propriedades reológicas são exibidas por substâncias que possuem uma microestrutura complexa, como polímeros, lama, substâncias parecidas com suspensões, alimentos e aditivos, fluidos corporais, outros biomateriais que se enquadram na categoria de matéria macia (OPIN, 2014).

Existem duas propriedades reológicas de particular importância para a ciência hidrocolóide. Estas são suas propriedades de gel e fluxo. Os materiais elastoméricos apresentam tanto características de materiais sólidos como de líquidos, sendo assim considerados materiais visco elásticos. Nas operações convencionais de processamento, esses materiais ficam sujeitos a vários tipos de deformações, devido à complexidade dos equipamentos. Esses materiais respondem à ação das deformações com um comportamento reológico viscoelástico, ou seja, uma combinação de respostas elásticas e viscosas. As propriedades viscoelásticas têm grande influência sobre o desempenho dos artefatos de borracha. Essas propriedades podem ser determinadas, permitindo assim, em alguns casos, o estabelecimento de uma relação com o comportamento dos materiais elastoméricos durante o seu processamento.

Fluidos com um valor constante de viscosidade para uma temperatura específica entram na categoria de fluidos newtonianos. Aqui a viscosidade muda com a temperatura, mas não varia com a taxa de deformação. Apenas poucos fluidos têm essa viscosidade constante e são conhecidos como fluidos newtonianos. Entretanto, para o outro grande grupo de fluidos, a viscosidade muda com a taxa de deformação e são chamados fluidos não newtonianos. Usualmente, as propriedades viscoelásticas dos elastômeros (polímero) são definidas com base em diferentes

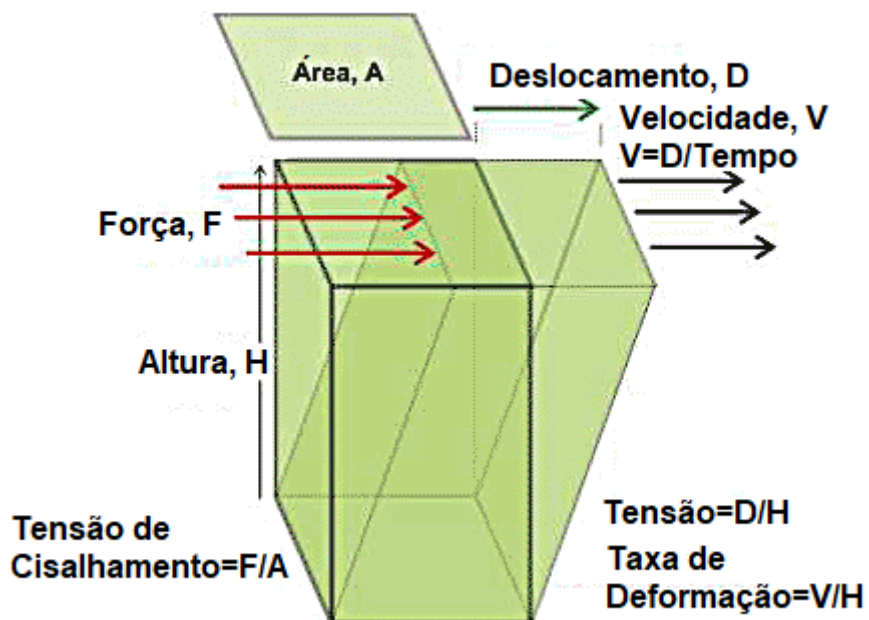
parâmetros, incluindo temperatura, pressão e tempo. Outras variáveis importantes que afetam a viscoelasticidade de um polímero são peso molecular e distribuição de peso, composição química, grau de endurecimento e cristalinidade, tipos de concentração de componentes, diluição com solventes ou plastificantes e mistura com outros materiais para formar compostos (WASHINGTON, 2002). A dependência acima da viscoelasticidade de polímeros com tais variáveis pode ser explicada com base na teoria molecular. Isso é possível através da introdução de novos conceitos como volume livre, o coeficiente de atrito monomérico e espaçamento entre locos de emaranhamento. Estes fatores podem ser manipulados para adaptar as propriedades físicas e químicas, alterando a microestrutura. A viscoelasticidade indica a resposta combinada através das propriedades viscosa e elástica dos materiais, que está sob tensão.

Viscoelasticidade de um material é devido a movimentos de moléculas de polímeros flexíveis e seus enredamentos e junções de rede. Assim, o rearranjo destas moléculas de polímero para um curto intervalo é muito rápido, enquanto que para um longo intervalo é muito lento. Mais do que isso, sob tensão, uma nova variedade de configurações pode ser obtida. A natureza e as taxas de mudança dos rearranjos configuracionais e a natureza das interações moleculares em uma ampla gama de escalas temporais podem ser obtidas pelo estudo das propriedades viscoelásticas (LIPATOV, 1995).

2.2 VISCOSIDADE

A viscosidade é uma propriedade de fluidos que indica resistência ao fluxo. Quando uma força é aplicada a um volume de material, ocorre uma deformação. Se duas placas de área A separadas pela distância do fluido, altura da separação, (H) , são movidas na velocidade (V) por uma força (F) , uma em relação à outra, a lei de Newton afirma que a tensão cisalhante área paralela à força, F / A , (Pa) é proporcional à taxa de deformação de cisalhamento $(V / H, s^{-1})$. A constante de proporcionalidade é conhecida como viscosidade dinâmica $(\eta, Pa \times s)$, figura 1.

Figura 1 - Componentes elásticos e deslizantes do deslocamento causada por tensão de cisalhamento.



Fonte: Adaptado de Morton (1966).

O efeito tensão de cisalhamento é quantificado pelo deslocamento por unidade de altura (D / H) e a taxa desse efeito taxa de deformação é a velocidade por unidade de altura (V / H), onde a altura é a distância a uma posição não afetada, observada na figura 2. A viscosidade (η) é a tendência do fluido para resistir ao fluxo e é definida por:

$$\eta = \frac{\text{Tensão de Cisalhamento}}{\text{Taxa de Deformação}} \quad (1)$$

Figura 2 - Comparação Fluido Dilatante, Fluido Pseudoplástico e Fluido Newtoniano.



Fonte: Adaptado de Morton (1966).

Um material dilatante é aquele em que a viscosidade aumenta com a taxa de deformação por cisalhamento. Um tal fluido espessante de cisalhamento, também conhecido pela sigla STF, é um exemplo de um fluido não newtoniano, pseudoplasticidade é uma propriedade exibida por alguns materiais nos quais a viscosidade diminui com o aumento da tensão de cisalhamento. Esta propriedade aparece em fluidos resultantes de soluções complexas, tais como lava, ketchup, cremes batidos, sangue, tintas e vernizes de unhas

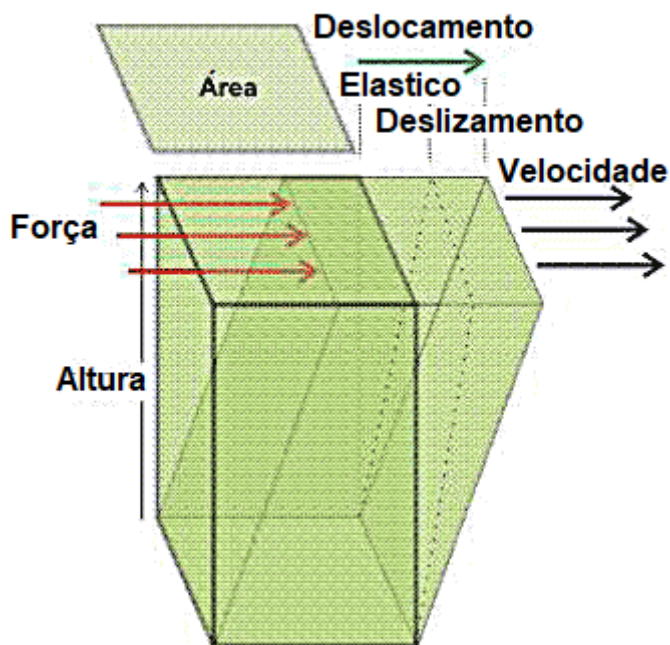
Aumentar a concentração de uma substância dissolvida ou dispersa geralmente dá origem ao aumento da viscosidade, isto é, espessamento, assim como o aumento da massa molecular relativa peso molecular de um soluto.

Com fluidos newtonianos, tipicamente água e soluções contendo apenas material de baixa massa molecular, a viscosidade é independente da taxa de deformação e uma parcela da taxa de deformação por exemplo, a taxa de agitação contra tensão de cisalhamento por exemplo, força, por unidade área agitada, necessária para mexer é linear e passa pela origem.

2.3 VISCOELASTICIDADE

Muitos hidrocolóides são capazes de formar géis de várias resistências, dependendo de sua estrutura e concentração, além de fatores ambientais, como força iônica, pH e temperatura. A viscosidade combinada e o comportamento do gel (viscoelasticidade) podem ser examinados determinando o efeito que uma força oscilante tem no movimento do material, figura 3.

Figura 3 - Componentes elásticos e deslizantes do deslocamento causado por tensão cisalhante.

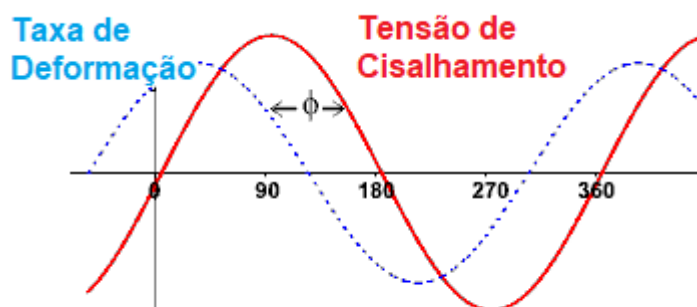


Fonte: Adaptado de Morton (1966).

Com os hidrocolóides viscoelásticos, parte da deformação causada pela tensão de cisalhamento é elástica (por exemplo, a contorção das correntes em conformações de alta energia) e retornará a zero quando a força é removida. A deformação remanescente (isto é, o deslocamento deslizante das correntes através do solvente) não retornará a zero quando a força for removida. Sob uma força constante, o deslocamento elástico permanece constante, enquanto o deslocamento deslizante continua aumentando.

Se a força varia sinusoidalmente com o tempo, então a energia viscosa (deslizante) é sempre positiva e perdida como calor, enquanto as mudanças na energia elástica podem ser positivas ou negativas e são recuperadas, figura 4.

Figura 4 - Onda senoidal atrasada da taxa de cisalhamento por trás da tensão de cisalhamento.



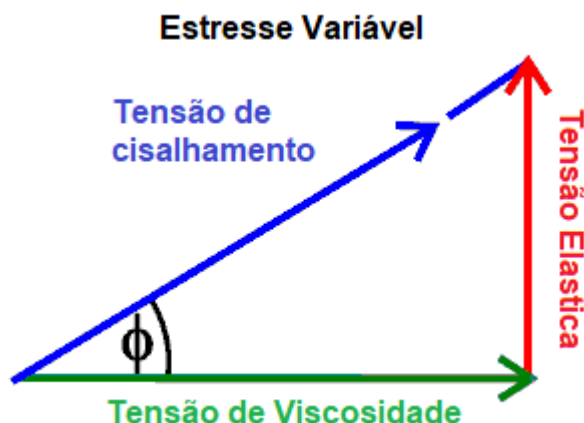
Fonte: Adaptado de Mezger (2014).

Sob tais condições, a taxa de deformação de cisalhamento fica atrás das mudanças na força causadora por um ângulo de fase ϕ . ϕ é zero para um gel idealmente elástico (toda a energia armazenada no material) e 90° para um líquido idealmente viscoso (toda a energia é dissipada como calor).

$$\text{Tensão de Cisalhamento} = \text{Taxa de Deformação} \times \sin(\omega t + \phi) \quad (2)$$

Os sólidos respondem com atrasos muito curtos na resposta de saída (ϕ muito pequena), enquanto os líquidos têm maiores atrasos. Em soluções reais, a onda de tensão de cisalhamento pode não manter a forma da taxa de deformação, figura 5.

Figura 5 – Relação entre tensão de cisalhamento e tensão elástica.



Fonte: Adaptado de Mezger (2014).

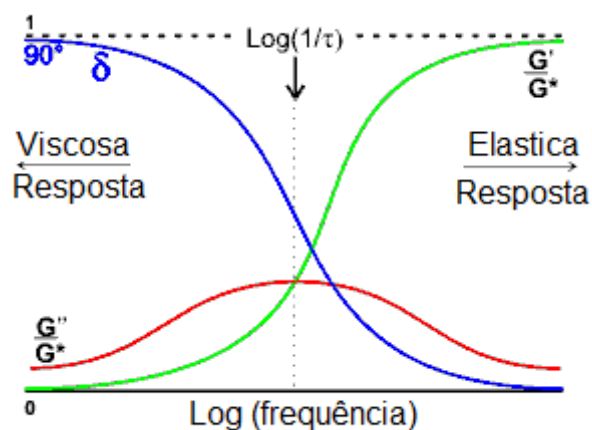
É conveniente expressar a relação entre a tensão de cisalhamento, a tensão elástica e a tensão viscosa (resultante da mudança de tensão) em termos de um número complexo ($\sqrt{-1} = i$) onde a tensão viscosa está em fase e a tensão elástica está fora de fase e dirigido de forma oposta, figura 6.

$$\text{Tensão de Cisalhamento} = \text{Tensão Viscosidade} - i \times \text{Tensão Elástica} \quad (3)$$

$$\text{Viscosidade Complexa} = \text{Viscosidade} - i \times \text{Elasticidade} \quad (4)$$

$$\tan(\varphi) = \text{elástica/viscosidade} \quad (5)$$

Figura 6 - Variação dos parâmetros viscoelástico com frequência.



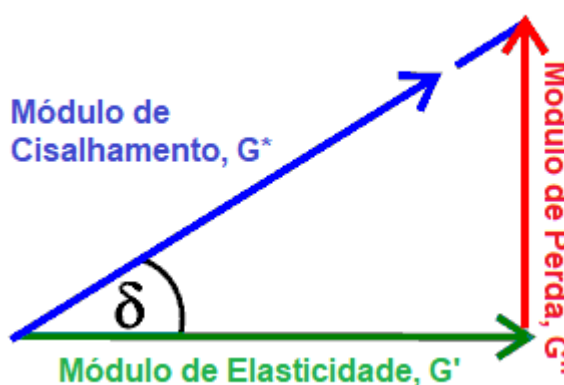
Fonte: Adaptado de Mezger (2014).

O módulo de cisalhamento (resultante da mudança de tensão) é a relação entre a tensão de cisalhamento e a deformação de cisalhamento. Segue-se da relação complexa semelhante à acima que:

$$G^* = G' + iG'' \quad (6)$$

Onde G^* é o módulo de cisalhamento complexo, G' é o módulo de armazenamento em fase e G'' é o módulo de perda fora de fase similarmente direcionado; $G^* = \sqrt{(G'^2 + G''^2)}$. A frequência em que esses parâmetros se cruzam corresponde a um tempo de relaxamento (τ) específico para o material, figura 7.

Figura 7 – Relação entre módulo de cisalhamento e módulo de elasticidade.



Fonte: Adaptado de Mezger (2014).

Segue que;

$$\tan(\delta) = G''/G' \quad (7)$$

Onde $\tan(\delta)$ quantifica o balanço entre perda de energia e armazenamento.

Como $\tan(45^\circ) = 1$, um valor para $\tan(\delta)$ maior que a unidade indica mais propriedades "líquidas", enquanto um menor que a unidade significa mais propriedades "sólidas", independentemente da viscosidade.

2.4 POLÍMEROS

Os elastômeros são polímeros com propriedade elástica especial conhecida como viscoelasticidade e com baixo módulo de Young e alta tensão de ruptura quando comparados a outros materiais. O termo elastômero surge do polímero elástico e às vezes usado como substâncias semelhantes à borracha. Os monômeros desses polímeros são feitos de carbono, hidrogênio, oxigênio e silício. Eles são de natureza amorfa e sua existência é sempre superior à temperatura de transição vítrea, o que facilita o movimento segmentar em elastômeros.

Os elastômeros também são conhecidos como conjuntos térmicos, que requerem vulcanização ou cura e, ao mesmo tempo, são termoplásticos. A ligação de cadeias poliméricas durante a vulcanização / cura é conhecida como reticulação. As cadeias poliméricas reticuladas distribuem a tensão aplicada e atingem a propriedade de elasticidade para recuperar seu tamanho e forma na retirada da força de deformação. Estas ligações cruzadas entre monómeros convertem realmente um polímero num elastômero. Na ausência desta ligação, a aplicação de tensão em um polímero produzirá um conjunto permanente de deformação com elasticidade zero ou máxima plasticidade (XIE, 2011).

2.5 FERRO FLUIDOS

Os ferrofluidos são fluidos reológicos e encontram inúmeras aplicações de engenharia. Eles geralmente contêm partículas de ferrita que têm menos de 10 nanômetros de diâmetro e exibem apenas reologia dependente de campo fraco. Também é conhecido como um magneto líquido e é uma mistura coloidal de nanopartículas magnéticas. Um surfactante bloqueado nas partículas magnéticas evita que as partículas magnéticas fiquem coladas. Os ferrofluidos podem ser sintetizados com hidrocarbonetos como transportadores ou podem ser de base aquosa. Os ferrofluidos à base de hidrocarbonetos encontram aplicações de engenharia, enquanto os fluidos à base de água são conhecidos pelas suas aplicações biomédicas (SCHUMANN, 2020).

Eles são usados em alto-falantes *high-end* e nas cabeças de laser de CD e DVD players. Seus usos importantes são em vedações de baixa fricção para motores de eixo rotativo, discos rígidos de computador, estudo de estrutura de domínio magnético em fitas magnéticas, disco rígido e flutuante, rochas geológicas, discos magneto-ópticos, ligas cristalinas e amorfas, granadas, aços, transporte de medicamentos, etc. Na ausência de um campo magnético, todas as partículas magnéticas em ferrofluido são orientadas em direções aleatórias. Ao aplicar um campo magnético, todas as partículas magnéticas suspensas se alinham na direção do campo magnético, produzindo picos na direção do campo. Retirada o campo irá restaurar a orientação aleatória de partículas magnéticas no fluido transportador (SCHERER, 2005).

2.6 FLUIDOS MAGNETO REOLÓGICOS

Como o tamanho da partícula suspensa em um fluido com ferro é de 10 nm, suas propriedades magnéticas são inferiores às suas contrapartes em massa. Portanto, não pode ser usado em amortecedores, embreagens e freios. Para isso, temos que preparar líquidos MR usando partículas de tamanho micron como carga.

A aplicação de fluidos MR é de relevância para os engenheiros e pode ser usada em muitos dispositivos de amortecimento. Aqui os ferrofluidos não são preferidos (WANG, 2011). A razão para isso é simples. Existe uma enorme diferença na tensão de cisalhamento de rendimento do MR e dos ferrofluidos, que afeta a força máxima que o fluido pode fornecer. Os fluidos MR são mais eficientes que os fluidos ER, pois possuem forças de interpartículas induzidas por campo alto e têm alto rendimento de tensão que os fluidos ER.

2.7 FUNDAMENTOS DO MAGNETISMO

Os primeiros experimentos com magnetismo envolveram a magnetita, conhecida por sua capacidade de atrair pedaços de ferro. Portanto, o magnetismo começou com ferrites. Agora, devemos explicar como uma substância espontaneamente magnetizada exhibe as propriedades magnéticas que nos são familiares. Se todos os momentos em uma amostra macroscópica estivessem alinhados, um campo magnético externo muito forte seria produzido. Este campo magnético representa uma grande quantidade de energia, se os momentos fossem rearranjados para reduzir este campo externo, então a energia livre total seria reduzida e tornaria um estado mais estável. Os ímãs desempenham um papel importante em nossa vida diária, como estamos familiarizados, uma variedade de dispositivos é empregada na indústria eletromagnética (WILEY,2015).

2.8 CLASSES DE MATERIAIS MAGNÉTICOS

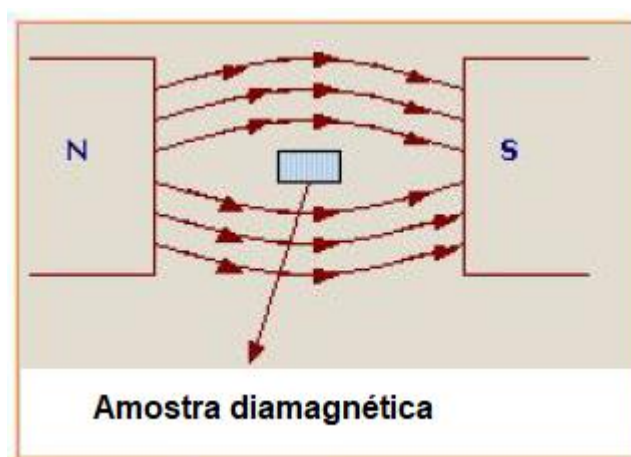
A origem do magnetismo é baseada em movimentos orbitais e de spin de elétrons e como eles interagem uns com os outros. Diferentes tipos de magnetismo podem ser definidos com base na resposta desses materiais a campos magnéticos. Pode-se ver que a matéria é de natureza magnética, mas com alguma diferença nas suas propriedades magnéticas. Em alguns materiais, não há interação coletiva de momentos magnéticos atômicos, enquanto outros materiais exibem forte interação magnética. Eles são classificados em (1) Diamagnetismo, (2) Paramagnetismo, (3) Ferromagnetismo, (4) Antiferromagnetismo e (5) Ferrimagnetismo.

Os dois primeiros no grupo não têm interação magnética coletiva e não são ordenados magneticamente. No entanto, nos últimos três grupos, os materiais exibem uma ordem magnética de longo alcance abaixo de uma certa temperatura crítica. Os materiais ferromagnéticos e ferrimagnéticos são geralmente considerados como "magnéticos". Os demais são fracamente magnéticos e considerados "não magnéticos".

(1) Diamagnetismo:

É uma propriedade fundamental de todos os materiais, embora seja geralmente muito fraca. É devido ao comportamento não-ordenativo de elétrons orbitais quando colocados em um campo magnético (HECK, 1974). Os materiais diamagnéticos são compostos de átomos, que possuem momentos magnéticos líquidos. Isso ocorre porque todas as conchas orbitais estão cheias e não há elétrons livres. No entanto, quando exposto a um campo magnético, um magnetismo negativo é produzido e, portanto, a susceptibilidade desses tipos de materiais é negativa. No campo zero, a magnetização também é zero. A suscetibilidade de uma substância diamagnética é dependente da temperatura. Exemplos de materiais diamagnéticos são quartzo, calcita e água. Um material diamagnético típico sob a influência de um campo magnético é mostrado abaixo, figura 8.

Figura 8 - Amostra diamagnética



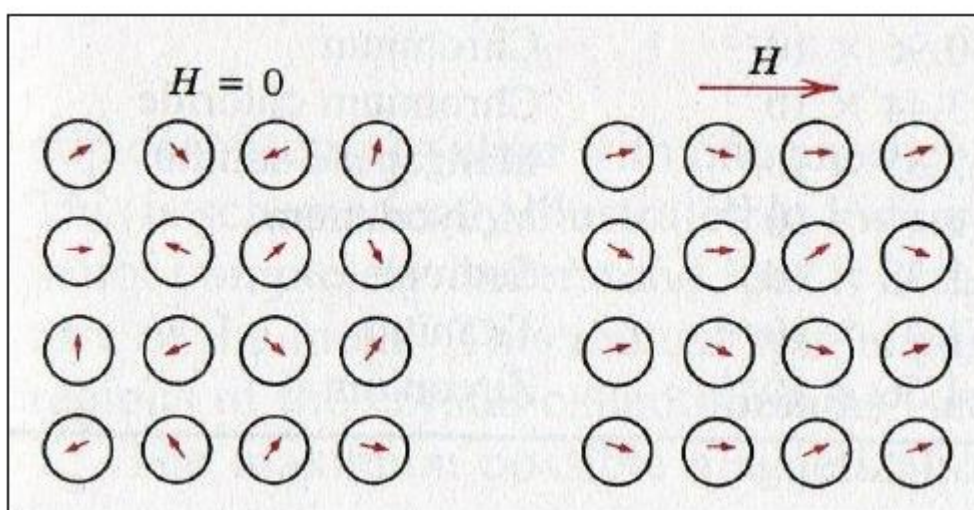
Fonte: Adaptado de Heck (1974).

(2) Paramagnetismo:

Neste tipo de materiais, alguns átomos ou íons têm um momento magnético líquido devido a elétrons não pareados em suas órbitas parcialmente preenchidas. Como o diamagnetismo, neste caso também os momentos magnéticos individuais não interagem magneticamente. Assim, quando o campo é removido, a magnetização é reduzida a zero. No entanto, na presença de um campo magnético, há um alinhamento parcial dos momentos magnéticos atômicos na direção do campo resultando em uma magnetização líquida positiva e a susceptibilidade positiva

de uma substância paramagnética é dependente da temperatura e baseada na Lei de Curie (SPALDIN, 2003). Sob temperatura normal e campo moderado, a suscetibilidade paramagnética é pequena. Mas para temperaturas muito baixas e alto campo é independente do campo aplicado, mas depende do conteúdo total de ferro nele, figura 9.

Figura 9 - Paramagnético.



Fonte: Adaptado de Spaldin, (2003).

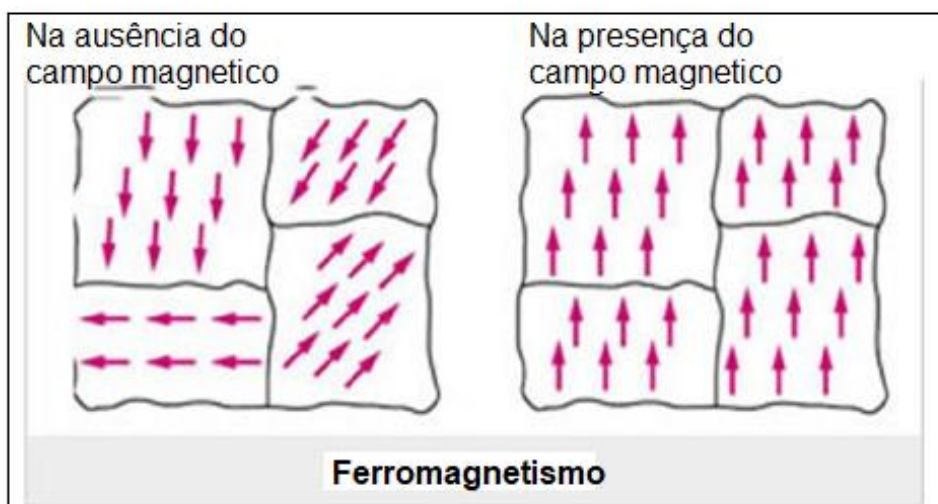
Muitos minerais contendo ferro são de natureza paramagnética à temperatura ambiente. Alguns exemplos são Monotmorilonite (argila), Pirita (sulfeto), Nontronita (argila rica em Fe), Biotita (silicato), Siderita (Carbonato).

(3) Ferromagnético:

Ao contrário dos materiais paramagnéticos, os momentos atômicos nesses materiais exibem interações muito fortes. Eles são produzidos pelas forças de troca eletrônica e resultam em alinhamento paralelo e antiparalelo dos momentos atômicos. A magnitude dessas forças de troca é muito alta e é da ordem de 1000 Tesla. A força de troca é um fenômeno da mecânica quântica que surge da orientação relativa dos spins dos elétrons livres. Materiais ferromagnéticos geralmente mostram alinhamento paralelo de momentos resultando em grande magnetização líquida, mesmo na ausência de um campo magnético.

Duas características importantes dos materiais ferromagnéticos são (1) magnetização espontânea e (2) existência de temperatura de ordenação magnética (CHEN, 2011). A magnetização espontânea é a magnetização fluídica que existe em um volume microscópico uniformemente magnetizado na ausência de um campo. Sua magnitude depende dos momentos magnéticos de spin dos elétrons. A magnetização de saturação de um material ferromagnético é o momento magnético máximo induzido que pode ser adquirido por ele em um campo magnetizante. Além desse campo, a magnetização permanece uma constante e, portanto, é chamada de magnetização de saturação. A magnetização por saturação é uma propriedade intrínseca, independentemente do tamanho das partículas, mas dependente da temperatura. Quando comparada com a susceptibilidade paramagnética, a susceptibilidade ferromagnética é um valor muito alto. Mesmo que as forças de troca eletrônica no material ferromagnético sejam muito grandes, a energia térmica substitui a troca e produz um efeito aleatório. Isso acontece em uma temperatura específica chamada temperatura de Curie. Abaixo da temperatura de Curie, o material ferromagnético é ordenado e acima dele estão em estado desordenado, figura 10.

Figura 10 - Comportamento ferromagnético.



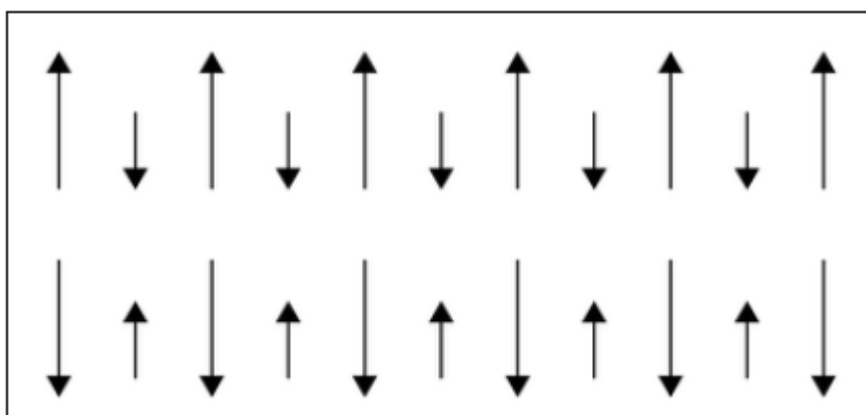
Fonte: Adaptado de Chen (2011).

A magnetização de saturação é a máxima magnetização possível de um material. A magnetização remanescente é quando campo magnetizado é removido. A coercividade é a força do campo de magnetização que deve ser aplicado ao material ferromagnético na direção oposta, de modo que a remanência se torne zero.

(4) Ferrimagnetismo:

Formas mais complexas de ordenação de momentos magnéticos podem ser vistas em compostos iônicos como óxidos. Um desses casos magnéticos é chamado de ferrimagnetismo. Neste material, a estrutura magnética é composta de duas sub-redes magnéticas separadas por oxigênio. As interações de troca são mediadas por um ânion de oxigênio. Essas interações são chamadas de interações indiretas ou super troca (CHEN, 2011). As interações de super troca mais fortes resultam em um alinhamento antiparalelo de spins entre duas sub-redes. Em materiais ferrimagnéticos, esses momentos magnéticos das sub-redes não são iguais e resultam em um momento magnético final. Portanto, é bastante semelhante ao ferromagnetismo e é caracterizado por magnetização espontânea, temperatura de Curie, histerese e remanência. No entanto, eles possuem uma ordem magnética muito diferente. A figura 11 é a disposição dos momentos. A magnetita é um ferromagneto bem conhecido.

Figura 11 - Comportamento ferrimagnetismo.

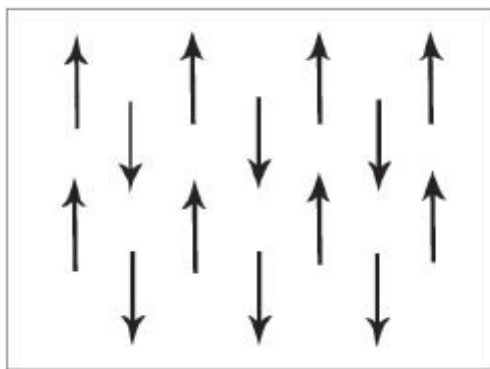


Fonte: Chen (2011).

(5) Antiferromagnetismo:

Quando os momentos magnéticos das duas sub redes em uma estrutura magnética são iguais e opostas, o momento magnético final é zero (figura 12). Esse tipo de ordenação magnética é chamado de antiferromagnetismo. Os materiais magnéticos antiferro também têm zero remanência, sem histerese, mas um pequeno valor positivo para suscetibilidade que varia com a temperatura. No caso do antiferromagnetismo, há uma temperatura crítica chamada *Neel temperature*, acima da qual a suscetibilidade obedece à Lei Curie-Weiss para materiais paramagnéticos, mas com um intercepto negativo mostrando interações de troca negativas (HILZINGER, 2013). Se os spins nos dois sub redes são ligeiramente inclinadas, uma magnetização líquida muito pequena pode ser produzida. Isso é chamado de antiferromagnetismo inclinado. A hematita é um exemplo bem conhecido.

Figura 12 - Antiferromagnetismo.



Fonte: Hilzinger (2013).

2.9 ANISOTROPIA MAGNÉTICA

Materiais ferromagnéticos podem ser divididos em um grande número de sub volumes chamados domínios. Cada domínio é magnetizado espontaneamente para a saturação, mas a direção da magnetização varia de domínio para domínio. A soma vetorial líquida de todos os momentos, portanto, produz uma magnetização total próxima de zero. A dependência das propriedades magnéticas em uma direção específica é chamada de anisotropia magnética. Existem diferentes tipos de anisotropia. Eles são anisotropia magneto-cristalina que depende da estrutura cristalina, a anisotropia da forma é dependente do tamanho do grão e a anisotropia está relacionada às tensões aplicadas ou residuais.

A anisotropia magnética afeta a forma dos laços de histerese e controla o valor da coercividade e remanência. A anisotropia é de extrema importância na tecnologia, pois os Engenheiros de Materiais usam isso para aplicações comerciais.

Magneto anisotropia cristalina: É a energia necessária para desviar o momento magnético em um único cristal da direção favorável para contrária. As direções favoráveis e contrárias surgem da interação do momento magnético do spin com a rede cristalina conhecida como acoplamento de *spin orbit* (MAZDA, 1989).

Anisotropia da tensão: Outro efeito do acoplamento da órbita de spin é a magnetostricção. A magnetoestricção origina-se da dependência de tensão das constantes de anisotropia. Por magnetização, um cristal previamente desmagnetizado experimenta uma tensão que pode ser medida em função do campo aplicado ao longo do eixo cristalográfico principal. Um material magnético, portanto, muda de dimensão quando magnetizado. No processo inverso, a aplicação de uma tensão adequada pode produzir uma mudança na magnetização. Uma tensão uniaxial pode produzir um eixo simples de magnetização, se a tensão for suficiente para superar todas as outras anisotropias. A magnitude da anisotropia é descrita por mais duas constantes empíricas conhecidas como constante de magnetostricção e nível do deslocamento.

Anisotropia da forma: é devido à forma do grão. Um corpo magnetizado produzirá polos magnéticos na superfície. Essa distribuição de carga superficial, atuando isoladamente, é ela mesma outra fonte de campo magnético chamada de

campo desmagnetizador. É assim chamado porque atua em direção oposta à magnetização produzindo o mesmo.

2.10 TEORIA DO DOMÍNIO

Um material magnético é na verdade composto de pequenas regiões chamadas domínios magnéticos dentro de cada uma das quais a magnetização local é saturada, mas não necessariamente paralela. Os domínios são pequenos, mas muito maiores que as distâncias atômicas. A existência de domínios é muito importante porque algumas propriedades magnéticas, especialmente coercividade e remanência, variam com o tamanho dos grãos.

A coercividade máxima para um determinado material ocorre dentro do seu intervalo de domínio único. Para tamanhos maiores de grãos, a coercividade diminui à medida que os grãos se subdividem em domínios. Para tamanhos menores de grãos, a coercividade diminui novamente, mas desta vez devido à aleatorização da energia térmica. Os grãos de múltiplos domínios são magneticamente macios e possuem baixos valores de coercividade e remanência. À medida que o tamanho das partículas diminui continuamente dentro da faixa de domínio único, outro ponto crítico é atingido, no qual a remanência e a coercividade vão para zero. Neste estágio, a partícula se torna supermagnética. (VOIGTMANN, 2020)

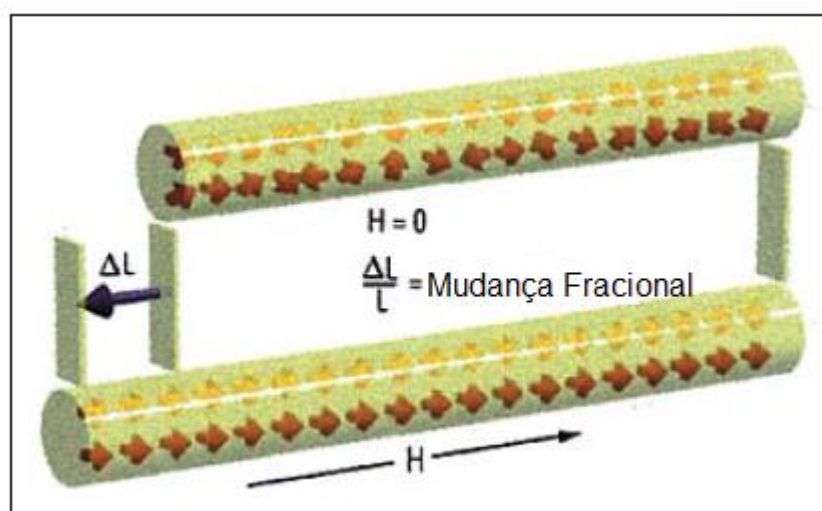
2.11 MAGNETOSTRICÇÃO

A deformação produzida em um elastômero magnetoreológico, sob um campo magnético aplicado, é chamada de Magnetoestricção. Materiais magnetostritivos são mecanicamente enviesados em operação normal. Uma carga compressiva é aplicada a um material, que é devido ao acoplamento magneto-elástico, força a estrutura do domínio a se orientar perpendicularmente à força aplicada. Quando um campo magnético é aplicado, a estrutura do domínio gira produzindo a tensão máxima possível no material. Uma pré-carga de tração deve orientar a estrutura do domínio paralelamente à força aplicada.

A magnetostricção pode ser medida observando as pequenas mudanças no comprimento da haste de elastômero quando um campo magnético externo é aplicado. Esta alteração no comprimento da haste é chamada de magnetostricção longitudinal $\lambda = \Delta L / L$. Na ausência de magnetização de saturação, o efeito combinado da magnetostricção longitudinal e transversal não causa nenhuma alteração no volume do material. Quando um campo magnético suficiente é aplicado para saturar a magnetização, tanto a magnetostricção longitudinal quanto a transversal têm o mesmo sinal, a mudança resultante no volume da haste é chamada de magnetostricção volumétrica (efeito Barrett). Como a magnetostricção volumétrica é sempre muito menor do que a magnetostricção longitudinal, o termo magnetostricção geralmente se refere à magnetostricção longitudinal ou linear (CHUNG, 2010).

Para uma MRE, as alterações de dimensão são devidas ao acoplamento interativo entre o campo magnético aplicado e os momentos magnéticos do domínio individual do material. Todos esses domínios magnéticos se alinham na direção do campo magnético. Esquema dos fenômenos acima é mostrado abaixo (Figura 13).

Figura 13 – Efeito do campo magnético em uma haste de elastômero magneto reológico.



Fonte: Chung (2010).

A anisotropia de um material magnético varia com a deformação e correspondentemente a rede de material magnético irá distorcer / esticar espontaneamente se a tensão resultante abaixar a energia de anisotropia.

A magnetostricção entre o estado desmagnetizado e a saturação é sensível à estrutura, de modo que as relações constitutivas gerais para a magnetostricção não são possíveis. No entanto, existe uma solução explícita para os casos em que as deformações são devidas principalmente a rotações de domínio de 90°. Na prática, essas rotações ocorrem em um único cristal com anisotropia uniaxial na qual o campo é aplicado em uma direção perpendicular ao eixo favorável ou a um material policristalino no qual os momentos magnéticos foram levados para completar o alinhamento em uma direção perpendicular à aplicada. O último caso implica que a energia de tensão perpendicular é suficiente para dominar a anisotropia cristalina.

$$\lambda = \frac{3}{2} \lambda_s \cos^2 \vartheta \quad (8)$$

Onde λ é a magnetostricção, λ_s é a magnetostricção de saturação e ϑ é o ângulo entre os vetores M_s e a direção do campo. Reconhecendo que a magnetização em massa ao longo da direção do campo é dada por:

$$M = M_s \cos \vartheta \quad (9)$$

Onde M é magnetização e M_s é magnetização de saturação acima da equação torna-se:

$$\lambda = \frac{3}{2} \lambda_s \left(\frac{M}{M_s} \right)^2 \quad (10)$$

Isso fornece uma relação quadrática entre a magnetização e a magnetostricção (GRIMES, 2011).

A principal vantagem das MREs é que as partículas não são capazes de se ajustar com o tempo e não há necessidade de uma estrutura para contê-las. A possibilidade de vazamento de resíduos não é mais relevante por ser um MRE sólido. Em segundo lugar, as partículas em um MR sólido não afetarão o desempenho e a durabilidade de um equipamento, tanto quanto a interação de partículas no fluido MR. Normalmente, os sólidos de MR funcionam apenas na

região de pré-produção, enquanto o fluido de RM geralmente funciona no estado de pós-produção.

Os elastômeros MR normalmente funcionam no regime de pré-produção da região viscoelástica linear. Em materiais viscoelásticos, parte da força de deformação ou energia de entrada correspondente é armazenada e liberada durante cada ciclo e alguns são dissipados como calor. O módulo de armazenamento G' representa a capacidade do material de armazenar energia de deformação, o que contribui para a rigidez do material. O módulo de perda G'' representa a capacidade do material de dissipar a energia de deformação.

Normalmente, partículas magneticamente macias são usadas como enchimentos em uma matriz apropriada para produzir acoplamento magneto-mecânico. O enrijecimento induzido por campo magnético é devido à interação dipolar magnética. A atração entre dois dipolos magnéticos pode aumentar o módulo de cisalhamento do material. A mudança de rigidez também depende da fração volumétrica da partícula, magnitude e frequência da deformação (LIGIA, 2009).

Ao medir a energia de interação magnética entre dois dipolos, a força da interação magnética pode ser calculada. Se o campo aplicado é ao longo das cadeias alinhadas e na direção vertical, a energia de interação magnética é dada por

$$U = \frac{\mu_0 m^2}{4\pi r^3 (1 - 3\cos^2\theta)} \quad (11)$$

Na qual, μ_0 é a constante magnética, θ é o ângulo entre a linha que conecta os dois dipolos e a direção da magnetização. A energia de interação magnética depende do momento dipolar e da geometria da cadeia.

2.12 LIMITE DE PERCOLAÇÃO

O limite de percolação ou conectividade é um conceito matemático na teoria da percolação, que descreve a formação de conectividade de longo alcance em sistemas aleatórios e depende da dimensionalidade da estrutura, de sua forma bem

como da simetria das partículas. Em uma dada rede, uma fração de sítios deverá ser preenchida para criar um agregado de percolação e esta fração é definida como limite de percolação ou valor crítico de probabilidade de percolação p_c . Arranjo 2D quadrado $p_c = 0,59$ Arranjo cúbico simples 3D o valor de $p_c = 0,31$.

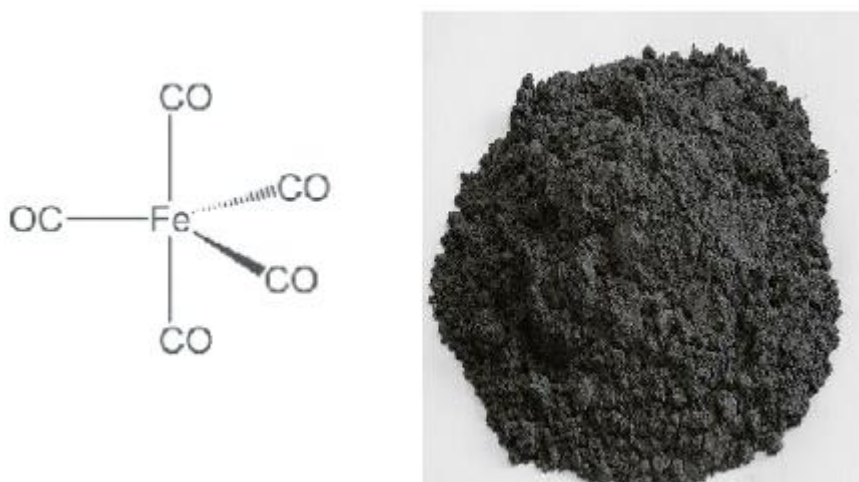
Na coordenada crítica, o volume crítico molar $V_c = 3b$ onde b é o parâmetro de co-volume ou volume excluído devido às repulsões. Assim a fração volumétrica no ponto crítico é dada por $x_v = b/3b = 1/3 = 0,33$, esse critério foi escolhido para estabelecer as relações utilizadas nesta pesquisa. (CHRISTENSEN, 2002).

3 MATERIAL E AMOSTRAS

Os materiais de enchimento apropriados para os sólidos de MRE são o ferro puro e ferro carbonila, graças à sua alta porosidade e baixo magnetismo remanescente e alta magnetização de saturação. A alta porosidade e a alta magnetização de saturação proporcionam uma alta interação inter-partículas e são responsáveis pelos altos resultados de interação no MRE. (PREMA, 2007)

Ferro carbonila é um ferro de alta pureza (97,5% para a classe S, 99,5% para o grau + R), preparado pela decomposição química do purificada pentacarbonil ferro, figura 14. Geralmente, tem a aparência de pó cinzento, composto de micropartículas esféricas. A maioria das impurezas são carbono, oxigênio, e azoto. (BASF, 2016)

Figura 14 – Estrutura do ferro carbonila.



Fonte: Mittal (2010).

3.1 O EFEITO MAGNETO-REOLÓGICOS

Os fluidos eletroreológicos e magnetoreológicos são também conhecidos como fluidos controláveis (SHENG, 2012). Eles são usados em freios rotativos de equipamentos aeróbicos e em um amortecedor linear para suspensões de bancos de caminhões para aumentar o conforto dos motoristas. Outra aplicação importante do fluido MR é no acabamento magneto-reológico de componentes ópticos.

Eles são muito úteis em dispositivos de transferência de tensão e amortecimento. Electro e magneto Fluidos reológicos mostram uma nova propriedade, na medida em que suas propriedades reológicas são dramaticamente alteradas pela aplicação de campos elétricos e magnéticos externos, respectivamente.

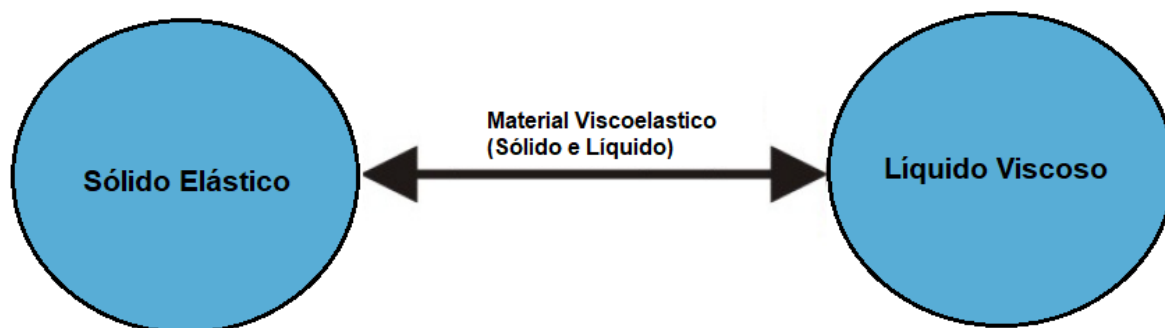
Polímeros eletricamente ativos (EAP) é o análogo de estado sólido de um líquido eletro-reológico. O EAP pode ser usado como sensores, atuadores e músculos artificiais. Uma mudança na voltagem aplicada altera a composição molecular ou estrutura do polímero que resulta em sua expansão, contração ou flexão. Este movimento do EAP é mais suave do que isso e produzido por

dispositivos mecânicos. Mas o consumo de energia do EAP é muito alto e sua vida útil também é muito curta. Músculos artificiais fabricados usando EAPs podem produzir movimentos naturais para dispositivos biomédicos e robóticos (ROSSI, 2004).

Muitos materiais, especialmente polímeros e seus compósitos são caracterizados por propriedades viscoelásticas. Isso significa que eles combinam as características de sólidos elásticos e líquidos viscosos, como esquematicamente mostrado na Figura 15. Seu comportamento é entre o sólido ideal descrito pela lei de Hooke, em que a tensão é sempre diretamente proporcional à deformação e é independente da taxa de deformação, e um líquido viscoso, no qual, de acordo com a lei de Newton, a tensão é sempre diretamente proporcional à taxa de deformação e não depende da tensão.

Materiais viscoelásticos sob deformação rápida se comportam mais como o corpo elástico, e sob muito lento - como líquido viscoso. A reologia descreve o fluxo e a deformação de sólidos e líquidos sob a influência de forças externas.

Figura 15 - Propriedades Viscoelásticas do material.



Fonte: Sheng (2012).

2.2 CLASSIFICAÇÃO DOS ELASTÔMEROS MAGNETO-REOLOGICOS

As MREs consistem em partículas magneticamente permeáveis (como ferro ou outro material ferromagnético). Partículas adicionadas a um material polimérico viscoelástico antes da reticulação. Os MREs contêm partículas ferromagnéticas tendo tamanhos de poucos a algumas centenas de μm . O ferro puro tem a maior magnetização de saturação de elementos conhecidos e também tem alta permeabilidade e baixa magnetização remanescente, proporcionando alta atração de curto prazo entre as partículas. Isto é Sabe-se da literatura disponível que a

quantidade e a forma das partículas, bem como a O tipo da matriz polimérica influencia as propriedades das MREs.

Os MREs podem ser classificadas de acordo com vários parâmetros como: tipo de partículas, matriz, estrutura e distribuição de partículas.

Classificação MREs:

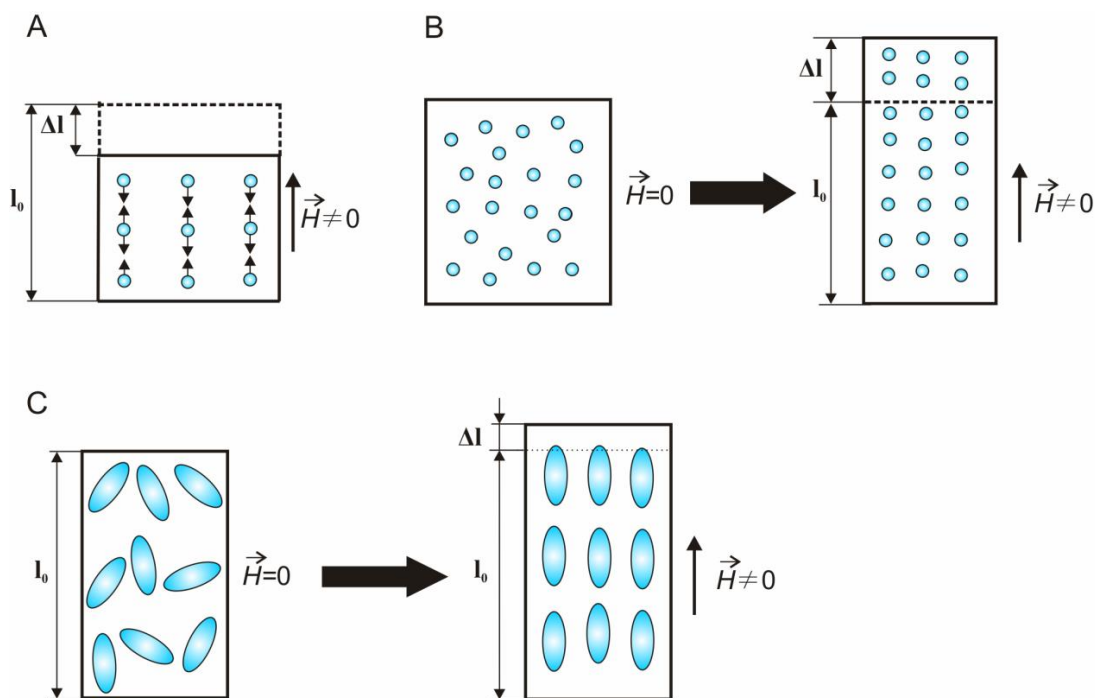
1. Propriedades magnéticas das partículas.
 - a. Partículas magnéticas macias
 - b. Partículas magnéticas duras
 - c. Partículas magnetostritivas
 - d. Partículas de memória de forma magnética
2. Estrutura da matriz.
 - a. Matriz sólida
 - b. Matriz porosa
- b. Propriedades elétricas da matriz.
 - a. Matriz de isolamento
 - b. Matriz condutora
4. Distribuição de partículas
 - a. Isotrópico
 - b. Anisotrópico

Normalmente, o campo magnético é aplicado aos compósitos poliméricos durante a reticulação da matriz. Esse processo bloqueia as estruturas da cadeia de partículas colunares durante a cura final, dando propriedades anisotrópicas especiais. As formações de estruturas de partículas colunares dentro dos elastômeros correspondem a um estado de baixa energia dipolar. O compósito curado sob campo magnético requer energia adicional por causa das partículas deslocamento deste estado de baixa energia. A quantidade de trabalho necessária e o campo, o módulo de cisalhamento dependente aumenta constantemente com o

campo magnético aplicado (LI, 2008; BAILEY, 1985; XULIMENG, 2010) Alterações das propriedades em MREs sob a influência do campo magnético dependem fortemente na microestrutura formada durante a cura da matriz elastomérica, também como resultado de campo magnético. Interações entre partículas em um campo magnético aproximam-nos, resultando em maior rigidez do material. Isso altera as curvas de tensão-deformação (KCHIT, 2013). O campo magnético provoca uma mudança para maiores tensões. O mesmo mecanismo é responsável por o efeito de "magnetostriction", encurtamento do comprimento da amostra cilíndrica na presença de um campo magnético externo (MIETTA, 2012), conforme esquematizado na Figura 16-A, ou extensão, o MRE quando as partículas são distribuídas isotopicamente (ZHU, 2012). Sob a influência do campo, as partículas se movem na direção do campo, como mostrado na Figura 16-B. Este efeito é possível quando a adesão entre as partículas e a matriz é grande o suficiente para que o movimento das partículas leva à deformação da matriz elastomérica, que tem tal baixa rigidez que tais deformações podem ocorrer. Um fenômeno semelhante ocorre nos MREs, em que as partículas são esféricas e têm uma forma alongada (BELLANDER, 2016).

Então, sob a influência do campo magnético eles se tornam dipolos, girando na direção do magnético vetor de campo, que também leva à deformação do elastômero e, portanto, aumenta no comprimento da amostra (Fig. 16-C). Em todos os casos, essas mudanças são rápidas e totalmente reversíveis.

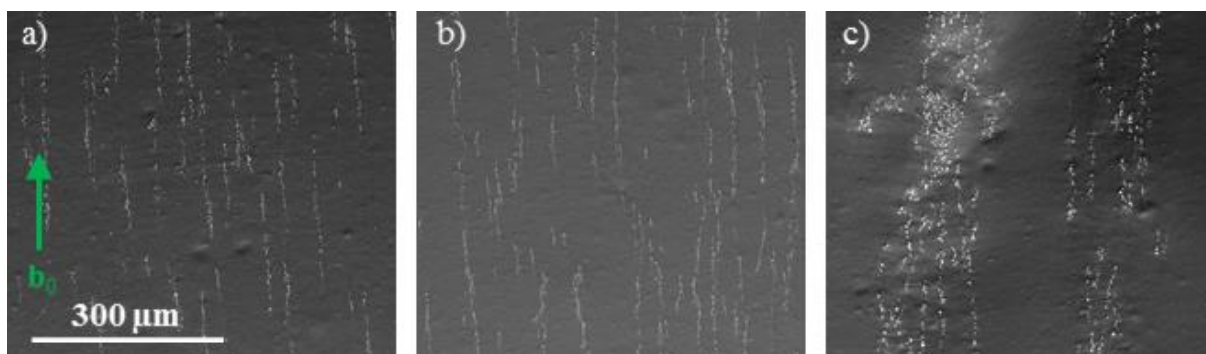
Figura 16 - Efeito magnetostricção em MREs sob campo magnético externo.



Fonte: Mietta (2012).

Se os campos magnéticos são aplicados ao compósito elastomérico durante o processamento, propriedades especiais anisotrópicas podem ser conferidas a estes materiais. Eles são, em seguida, chamados de MRE campo-estruturado e foi observado que eles são anisotrópicos em termos de propriedades mecânicas, magnéticas, elétricas e térmicas. Mais particularmente, um campo magnético uniaxial aplicado produz um alinhamento nas estruturas das partículas. As concentrações de partículas inicialmente formam cadeias que coalescem lentamente em colunas, como mostrado na figura 17, enquanto que a concentrações elevadas torna-se a morfologia um pouco mais complexo, com possível ramificação entre as colunas e uma ligeira perda de anisotropia. Um campo bi-axial (por exemplo, rotação) produz estruturas em forma de folha. Finalmente, com a geração de campos magnéticos tri-axiais durante o processamento, uma variedade de estruturas de partículas isotrópicas e anisotrópicas podem ser criados. MRE pode ainda ser classificada de acordo com os seus constituintes principais, isto é, matriz não magnética e as partículas de preenchimento magnético, bem como as suas propriedades inerentes. (POSSINGER, 2015)

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



Fonte: Possinger (2015).

Elas geralmente são compostas por uma matriz sólida, eletricamente isolante, tal como silicone borracha, borracha natural, poliuretano ou termoplásticos elastômeros. De fato, uma grande variedade de materiais de matriz, que abrange uma ampla gama de propriedades, resistência à tração ou a viscosidade pode ser encontrado no mercado e na literatura. Dentro de todas estas matérias no entanto, MREs base, são também muitas vezes chamadas elastômeros magneto-activas ou elastômeros sensível ao magneto. Respeitando a nomenclatura já utilizada, usaremos elastômeros magneto-reológicas (MRE) tal como definido.

A microscopia eletrônica de varredura de uma MRE estruturado em campo com baixa concentração de partículas, onde as partículas aparecem como pontos brancos alinhados pelo campo magnético aplicado na matriz elastomérica que aparece como fundo preto. A borracha de silicone desfruta de muita popularidade devido à sua excelente processabilidade, e ao bom compromisso entre as propriedades mecânicas, térmicas e envelhecimento, bem quanto ao seu uso generalizado em aplicações industriais. Além disso, possuir uma matriz macia com baixos módulos elásticos, são realizáveis em borrachas de silicone e tendem a aliviar a interação magneto-mecânica. Vamos observar também que a classe individual de "elastômeros macios magneto-reológico" tem sido afirmado, que abrange MRE cuja matriz é elasticamente macia. Esta categoria inclui magnética geles que consistem em partículas magnéticas dispersas numa matriz polimérica de tipo gel. Materiais do tipo gel (fluido dentro de um tridimensional fracamente reticulado de rede) pode, de facto ser muito mais suave do que os elastómeros clássico, no entanto, eles geralmente têm uma consistência pegajosa, e quando

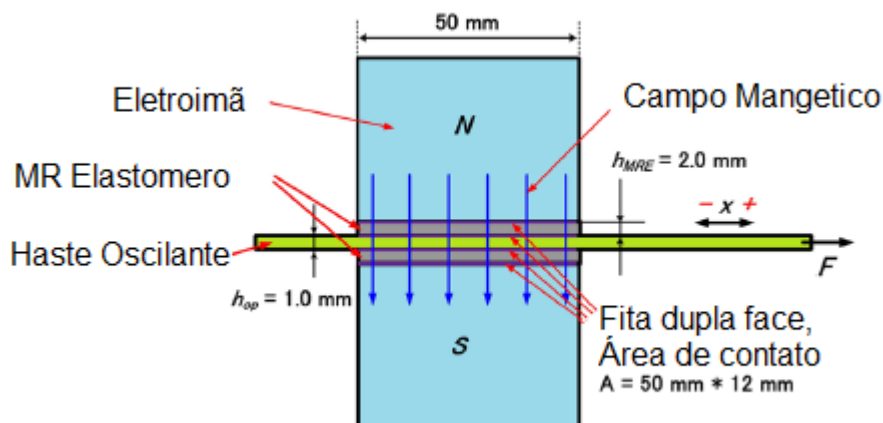
agitado, estes materiais começam a fluir (tixotropia), assim, resultando em propriedades mecânicas pobres. (POSSINGER, 2015)

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 (LI, 2019). Mais particularmente, um campo magnético uni-axial aplicado produz estruturas de partículas semelhantes a uma cadeia, a baixa concentrações de partículas inicialmente formam cadeias que lentamente se fundem em colunas, enquanto em altas concentrações a morfologia torna-se ligeiramente mais complexo, com possível ramificação entre colunas e uma ligeira perda em anisotropia (MARTIN, 1998; BOCZKOWSKA, 2012). Um campo bi-axial (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).

3.3 PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS

As amostras foram preparadas com concentrações específicas, com a finalidade de se observar alguma característica relevante, usando o trabalho de Tian, 2018, ele adota o seguinte modelo de estrutura de ensaio, figura 18.

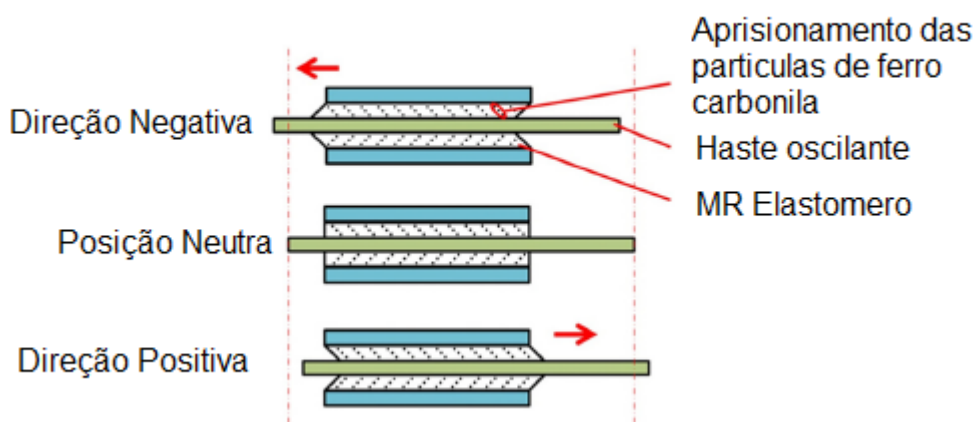
Figura 18 - Figura esquemática da construção de Tian 2018.



Fonte: Tian (2018).

A figura 19, mostra o movimento esperado na haste oscilante, e o deslocamento do MRE.

Figura 19 - Movimento do MRE.



Fonte : Tian (2018).

O MRE foi fabricado usando a borracha de silicone como ligante e o ferro carbonila como partícula, que foram misturados manualmente por 3 minutos a temperatura ambiente, posteriormente, a mistura foi colocada na estrutura, figura 20. Desta forma foram confeccionados amostras com diferentes concentrações (tabela 1) de ferro carbonila/silicone.

Tabela 1 - Concentração de Ferro carbonila no Silicone

Estimativa de Componentes das Amostras (Ferro Carbonila: $d=7,86 \text{ g/cm}^3$ SILICONE: $d=1,2\text{g/cm}^3$)						
Nome da amostra	Fração Si (% v/v)	Massa Si (g)	Fração de ferro (% v/v)	Massa de ferro (g)	Massa Total por amostra (g)	Volume da amostra (cm^3)
SiFe18%	82	1,10	18	1,58	2,7	1,12
SiFe33%	67	0,90	33	2,90	3,8	1,12
SiFe48%	52	0,70	48	4,23	4,9	1,12
Total	-	3,70	-	8,72		

Fonte: Próprio autor.

Figura 20 - Corpo de prova.



Fonte: Próprio autor.

Observou-se a formação de bolhas no interior da amostra, o que poderia ocasionar problemas na uniformidade, visto que o ar não é um bom condutor magnético, em uma das formas de diminuir a presença de ar, foi criado um sistema de câmara de vácuo, para tentar extrair o máximo possível de bolhas do interior da amostra.

Os materiais utilizados no experimento têm as seguintes especificações conforme informe do fabricante (Redelease)

BS Adesivo Branca OS (borracha de silicone): aparência → pasta macia; cor → branca; massa específica a 25°C → sólidos (180°C, 15 minutos); validade 24 meses.

Proporções de uso, segundo o manual fornecido, padrão, para 100% de silicone para 03% de catalisador (em massa/peso), ou seja, 100 gramas de silicone para 03 gramas de catalisador. Para controlar a densidade final da borracha, variar de 2% (menos densa) até 05% (mais densa), que esta proporção de catalizador influencia diretamente na densidade de ligações cruzadas, quanto mais ligações cruzadas mais catalizadoras é necessário e mais rígida é a borracha.

Depois de misturado o catalisador à borracha, terá aproximados 25 minutos de trabalho até que o processo de cura se inicie, para o tempo de cura parcial temos entre 04 a 06 horas, sendo que para a cura total será de 5 dias.

Para as amostra de Ferro carbonila, temos 97% de Fe, com uma massa molar de MM: 55,85 g/mol e uma densidade $d: 7,86 \text{ g/ml}$ a 25°C, lote # STBF3419V, fabricado por Sigma-Aldrich.

A opção de construção de corpos de prova modulares, ou seja, que se encaixam no eletroímã, foi mais eficiente e prático, então, reduzindo o tempo de montagem e variáveis, observado na figura 20, outro processo de inovação é a total substituição da utilização de adesivos e colas, visto que o silicone é um material que não é receptivo a essa finalidade, solucionando esse problema com a própria aderência do silicone nas bordas no tarugo de aço.

As modificações propostas do ensaio, proporcionaram resultados mais confiáveis, ou seja 100% da amostra permaneceu sem descolamento, e acabamos retirando um terceiro fator que estaria envolvido nos cálculos, o quando a fita dupla fase ou a cola iria influenciar nos resultados.

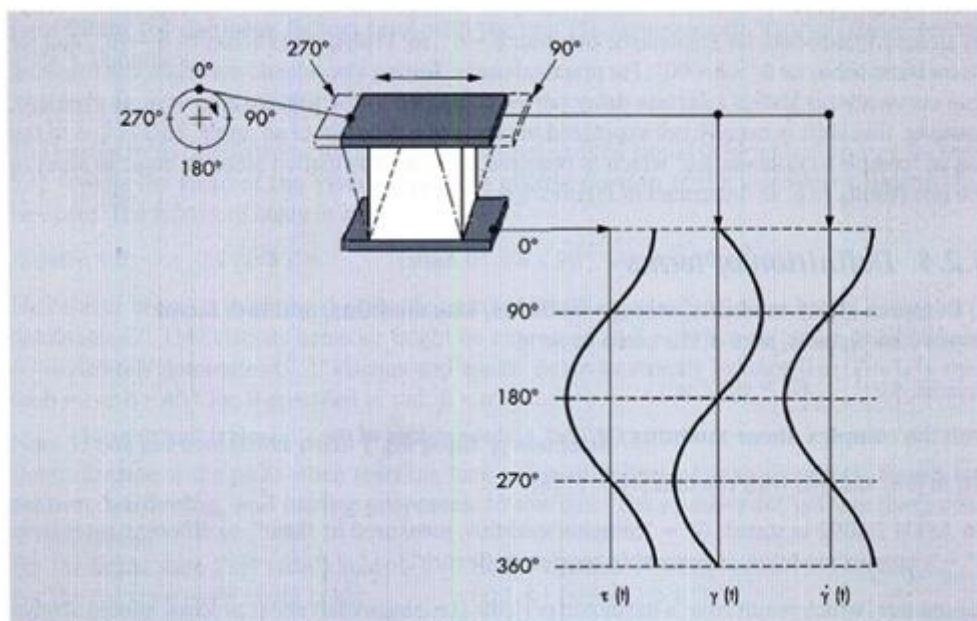
4 CARACTERIZAÇÃO MAGNETO REOLÓGICA

4.1 RIGIDEZ DINÂMICA E ÂNGULO DE FASE.

As seguintes observações são consideradas para os resultados que serão expostos abaixo.

- 1) As amostras aderem às duas placas e não desliza ou escorrega ao longo delas.
- 2) As amostras são deformadas homogeneamente durante todo o intervalo de cisalhamento. Então, a tensão de cisalhamento, figura 21, σ (Pa) = F/A e a deformação $y = \tan \varphi$.

Figura 21 - Função Seno e Cosseno, funções dependentes do tempo, para material ideal viscoso.

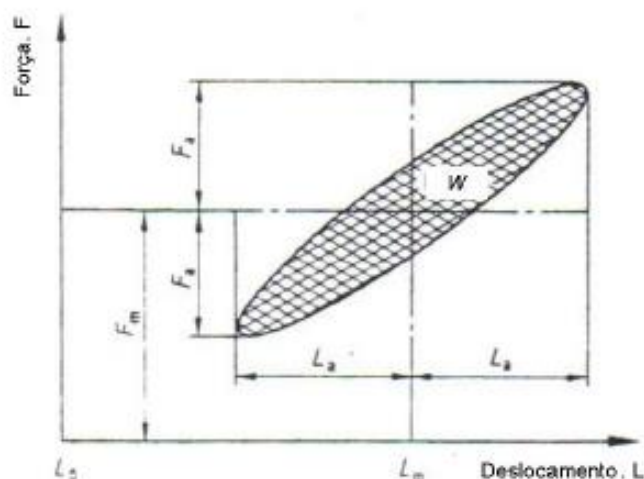


Fonte: Mezge (2006).

Quando em regime dinâmico, a resultante das forças do shaker atua sobre o MRE, impondo uma amplitude de força (F_a) com uma frequência (f). A aplicação da amplitude de força (F_a) gera consequentemente uma amplitude de deslocamento (L_a), tal regime leva a formação de uma histerese dinâmica tomando a forma de uma

elipse devido á característica de amortecimento do elastômero, conforme citado por Flower (1995), a histerese dinâmica é apresentada na figura 22, (DIN 53513, 1990).

Figura 22 - Diagrama carga deformação em regime dinâmico (histerese dinâmica).



Fonte: din 53513 (1990).

Quando realizamos testes baseados na variação por força, uma distinção deve ser feita entre pré carga (F_m) na qual é uma força constante e sua amplitude de força (F_a) que varia ao longo do tempo, para a variação senoidal excitada em uma frequência (f), a força (F) em um dado instante de tempo (t) é dada conforme eq.

$$F = F_m + F_a \cdot \text{Sen}(\omega \cdot t) \quad (12)$$

Onde:

F_m = Pré carga.

F_a = Amplitude de força

ω = velocidade angular ($\omega = 2 \cdot \pi \cdot f$)

t = tempo

A deformação (L) do material em dado instante de tempo considerando o material com comportamento linear, na qual é independente da magnitude da amplitude de força (F_a) é dado conforme eq.

$$L = L_m + L_a \cdot \text{sen}(\omega t - \varphi) \quad (13)$$

Onde:

L_m =deformação estática

L_a =amplitude do deslocamento

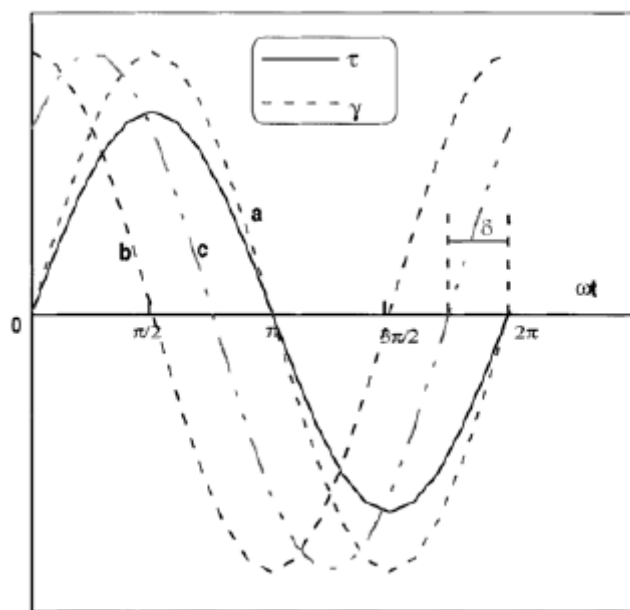
φ = ângulo de fase

ω = velocidade angular

t = tempo

A Figura 23 mostra relações relacionando tensões e deformações de três grupos de materiais, perfeitamente elásticos, puramente viscosos e viscoelásticos. Para um material elástico, a resposta a tensão está em fase com a deformação.

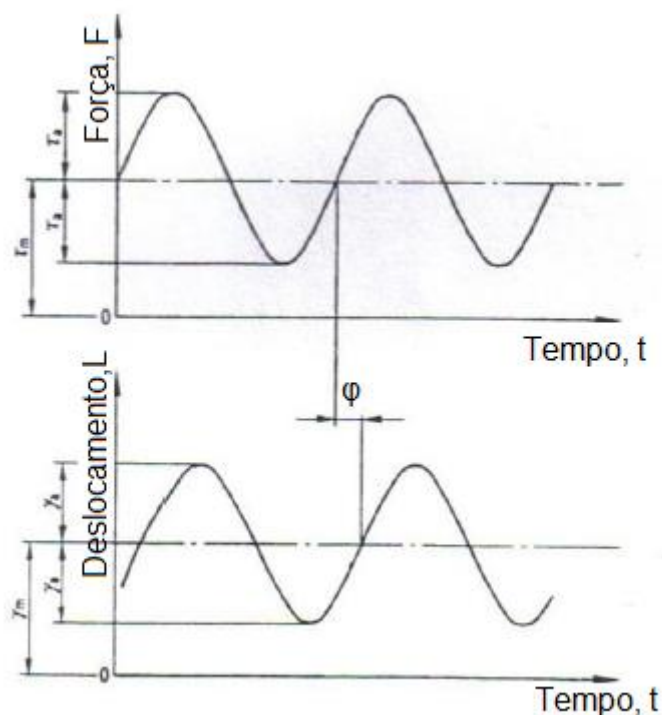
Figura 23 - Relação conectando tensões e deformações de três grupos de materiais, (a) Perfeitamente elástico, (b) Puramente viscoso e (c) Viscoelástico.



Fonte: Din 53513 (1990).

A variação no tempo da amplitude de deslocamento (L_a) tem a mesma frequência (f) que amplitude da força (F_a), porém com um atraso especificado pelo ângulo de fase (φ), conforme representado na figura 24 abaixo.

Figura 24 - Ilustração da fase entre as funções senoidais de força e deslocamento através do tempo.



Fonte: Din 53513 (1990).

Para caracterizar o comportamento visco elástico do MRE sob condições dinâmicas de deformação duas características devem ser especificadas, o fator de perda e a rigidez dinâmica.

O fator de perda (η) é definido pela eq;

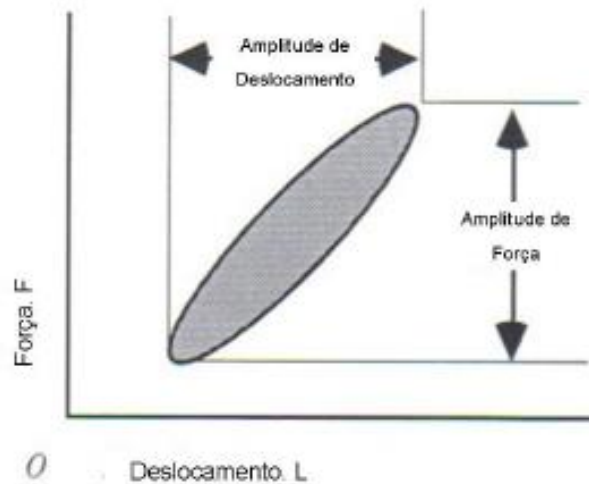
$$\eta = \tan(\varphi) \quad (14)$$

Onde o ângulo de fase (φ) especifica a quantidade pelo qual a frequência do deslocamento (deformação) está defasada em relação a frequência de aplicação de força conforme apresentado na figura.

Dentro deste contexto, temos a rigidez dinâmica (K_d) em função da frequência (f) que é determinada através da razão entre a amplitude da força (F_a) e da amplitude do deslocamento (L_a) originada pela histerese dinâmica apresentada na figura (DIN, 53513) e pela equação abaixo, visto na figura 25:

$$K_d = \frac{\text{Amplitude de Força (Pico a Pico)}}{\text{Amplitude de Deslocamento (Pico a Pico)}} \quad (15)$$

Figura 25 - Histerese dinâmica.



Fonte: Din 53513 (1990).

Devido ao amortecimento há a dissipação da energia mecânica (W) pela conversão em calor através da deformação mecânica do MRE. A energia devido ao amortecimento é igual à área da elipse formada pela curva de histerese dinâmica mostrada na figura e é dada conforme equação abaixo.

$$W = \pi F_a L_a \sin(\varphi) \quad (16)$$

Onde:

W = Energia dissipada devido ao amortecimento

F_a = Amplitude de força

L_a = Amplitude de deslocamento

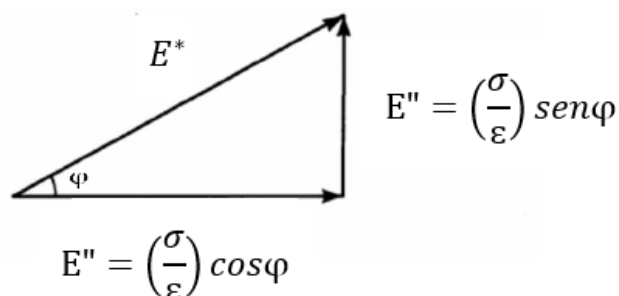
φ = Ângulo de fase

Na prática, utiliza-se o ângulo de fase para definir a característica de amortecimento do MRE conforme equação abaixo.

$$\text{Fase } _{(\varphi)} = \sin^{-1} \left(\frac{W}{\pi F_a L_a} \right) \quad (17)$$

De acordo com Gade *et al.* (1995), outra maneira de interpretação do ângulo de fase é através de vetores conforme a figura 26, onde E^* representa o Módulo de rigidez.

Figura 26 - Representação dos módulos através de vetores.



Fonte: Gade (1995).

E^* =Módulo de Rigidez;

E'' = Módulo de Perda;

E' = Módulo Elástico;

$\tan \varphi$ =Fator de Perda.

Segundo Gade (1995), a maioria dos elastômeros possui amortecimento e, portanto, o deslocamento se atrasa em relação à carga aplicada. Uma carga senoidal aplicada usualmente resulta em uma senoidal de deslocamento. O ângulo de fase entre as senóides permanece constante durante todo o ciclo de carga, mesmo podendo variar a amplitude de força e a frequência.

O módulo de rigidez (E^*) pode ser obtido multiplicando a rigidez dinâmica pelo comprimento inicial do MRE e dividindo pela área da secção da transversal do mesmo, desta maneira, temos a equação abaixo.

$$E^* = \left(\frac{F}{d}\right) \left(\frac{1}{A}\right) \quad (18)$$

Onde:

E^* = Módulo de rigidez

F = Força

d = Deslocamento ou deformação;

L = Comprimento inicial;

A = Área da secção.

O módulo coincidente em fase é chamado de módulo elástico e é dado pela equação abaixo.

$$E' = \left(\frac{F}{d}\right)\left(\frac{1}{A}\right)\cos\varphi \quad (19)$$

Onde:

E' = Módulo elástico

F = Força aplicada;

d = Deslocamento ou deformação

L = Comprimento Inicial;

A = Área da secção do MRE;

φ = ângulo de fase.

Aplicando trigonometria, temos o módulo de perda, dado pela equação abaixo:

$$E'' = \left(\frac{F}{d}\right)\left(\frac{1}{A}\right)\sin\varphi \quad (20)$$

Onde

E'' = Módulo de perda.

F = Força

D = Deslocamento ou deformação

L = Comprimento Inicial

A = Área da secção

φ = Ângulo de fase.

Para uma tensão de material puramente viscosa é 90° fora da fase com tensão e um material viscoelástico produziria uma tensão tendo componentes tanto em fase como fora de fase. Assim, a viscoelasticidade do material pode ser descrita por um módulo complexo G^* .

$$G^* = G' + iG'' \quad (21)$$

Onde G' é o módulo elástico e G'' é o módulo de perda (fora de fase). O fator de perda $\tan \delta$ do material é dado pela relação

$$\tan \delta = \frac{G''}{G'} \quad (22)$$

O fator de perda de um material é a razão da energia dissipada do material por radiano para a energia armazenada durante um estado de estudo de excitação sinusoidal. Materiais magnéticos reológicos na forma de fluidos, espumas e elásticos entram na categoria de materiais inteligentes e materiais funcionais. A aplicação de um campo magnético externo pode ajustar suas propriedades reológicas. Fluidos MR são líquidos cujas propriedades de fluxo de cisalhamento podem ser controladas para aplicações em transferência de torque e dispositivos de controle de vibração. As espumas MR são uma aplicação de alta qualidade dos fluidos MR com máxima eficiência. Os elastômeros MR são análogos de estado sólido de fluidos MR cuja rigidez pode ser controlada para fornecer dispositivos de suspensão e montagens sintonizáveis. No Departamento Nacional de Padrões dos EUA, Jacob Rabinow realizou um estudo inicial sobre fluidos MR. No mesmo período, William Winslow estava concentrado no trabalho associado aos fluidos eletro-reológicos. O modelo de plástico de Bingham forneceu uma explicação satisfatória para o comportamento de dependência de campo dos fluidos MR. Partículas de MR com tamanho de micron suportarão várias centenas de domínios magnéticos. A rotação do dipolo do domínio na presença de um campo causa a atração Inter partícula e, portanto, o efeito magneto-reológico máximo.

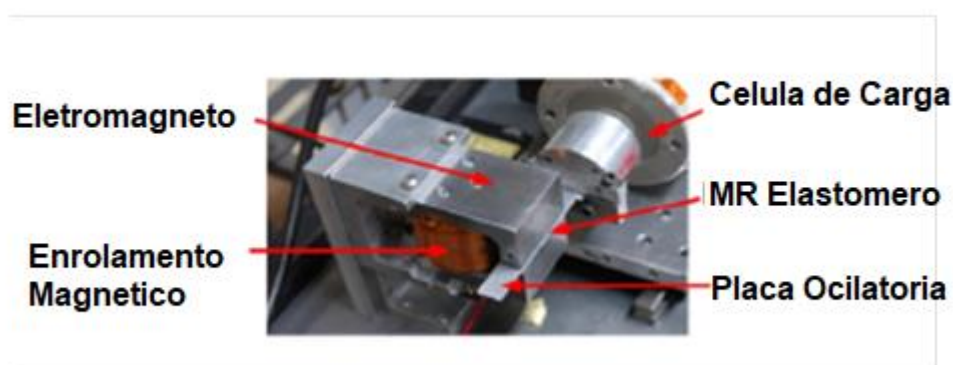
A quantidade de plasticidade contida no material é dada pelo fator de perda (η) que é dado pela razão entre o módulo de perda e o módulo elástico definido conforme equação abaixo.

$$\eta = \left(\frac{E''}{E'} \right) = \tan \varphi \quad (23)$$

4.2 MONTAGEM DO APARATO EXPERIMENTAL DE AQUISIÇÃO DA TENSÃO DE CISALHAMENTO x DESLOCAMENTO

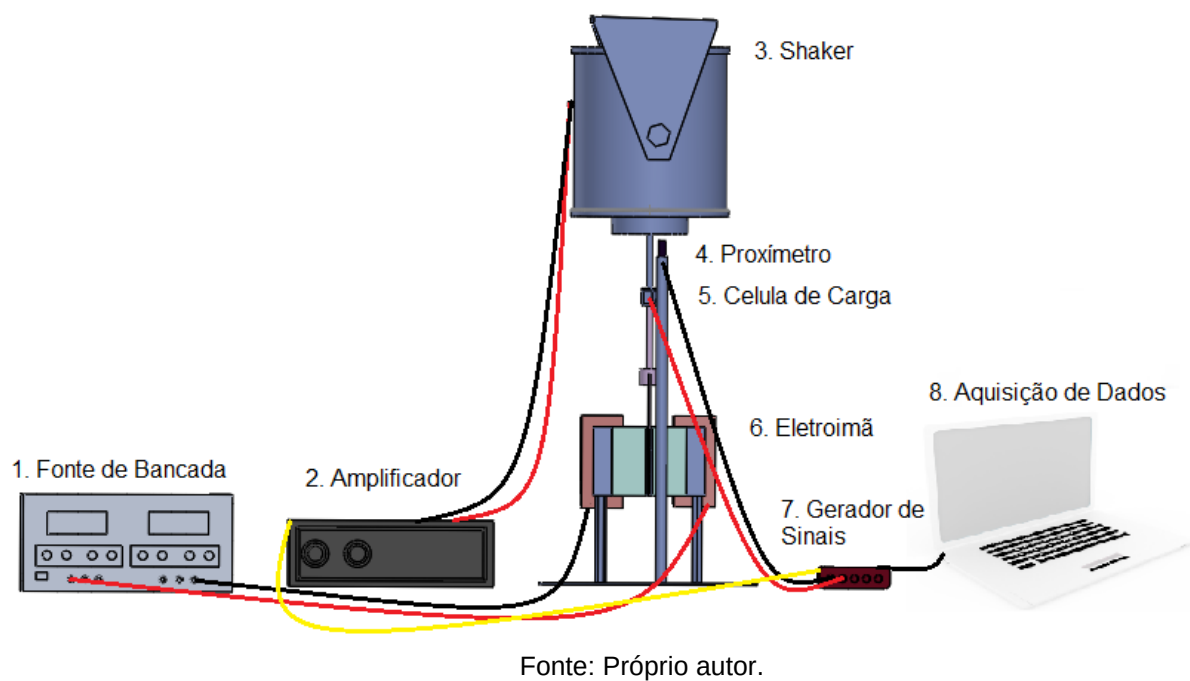
A figura 28, mostra os principais equipamentos e sensores utilizados para a obtenção dos dados apresentados nos resultados, primeiramente temos uma fonte de bancada que fornecera tensão ao eletroímã onde este, fornecera um campo magnético variável e constante entre 0,0 T a 0,5T, para a geração da onda senoidal que aplica uma força e um deslocamento no corpo de prova situado no eletroímã, teremos o gerador de sinais que fornecerá uma saída que irá para o amplificador, onde terá o seu sinal ampliado e assim alimentara o *shaker*. Para a medição do deslocamento iremos dispor de um proxímetro e para mediar a força utilizaremos a célula de carga, a construção do protótipo foi baseada na construção de tian, 2006, figura 27.

Figura 27 – Esquema de construção



Fonte: Tian (2006).

Figura 28 - Construção e montagem da bancada de ensaio



A figura 29, é uma foto ilustrativa real do aparamental na bancada experimental.

Figura 29 - Bancada Experimental



4.3 SISTEMAS DE ANÁLISE

A coleta de dados desta pesquisa será utilizando o sistema Quattro, onde os sinais de entrada como força e deslocamento serão adquiridos assim como os sinais senoidais de saída. A análise dos dados será feita com foco no funcionamento do processo da análise de vibração, com intuito de explicar sobre o funcionamento do processo, os tipos de sensores utilizados, como o sinal é convertido para uma imagem gráfica, e como tal análise pode contribuir para futuras pesquisas.

4.4 O SISTEMA DE MONITORAMENTO DE VIBRAÇÃO

Na opção utilizada possui 6 Canais, este equipamento é utilizado para medições nível global (Velocidade\Aceleração\Deslocamento) Espectros de Velocidade e aceleração envelope de espectro parâmetros de processo (Temperatura \ RPM \ Vazão) Saídas Analógicas \ Saídas Digitais, 2 Saídas Analógicas 2 Entradas Digitais.

Proxímetros é o tipo de sensor utilizado para a medição do deslocamento relativo entre a extremidade do sensor e o eixo rotativo, ou outro corpo. São de melhor resposta para mancais de casquilhos (deslizantes). Também chamado de medição das vibrações relativas.

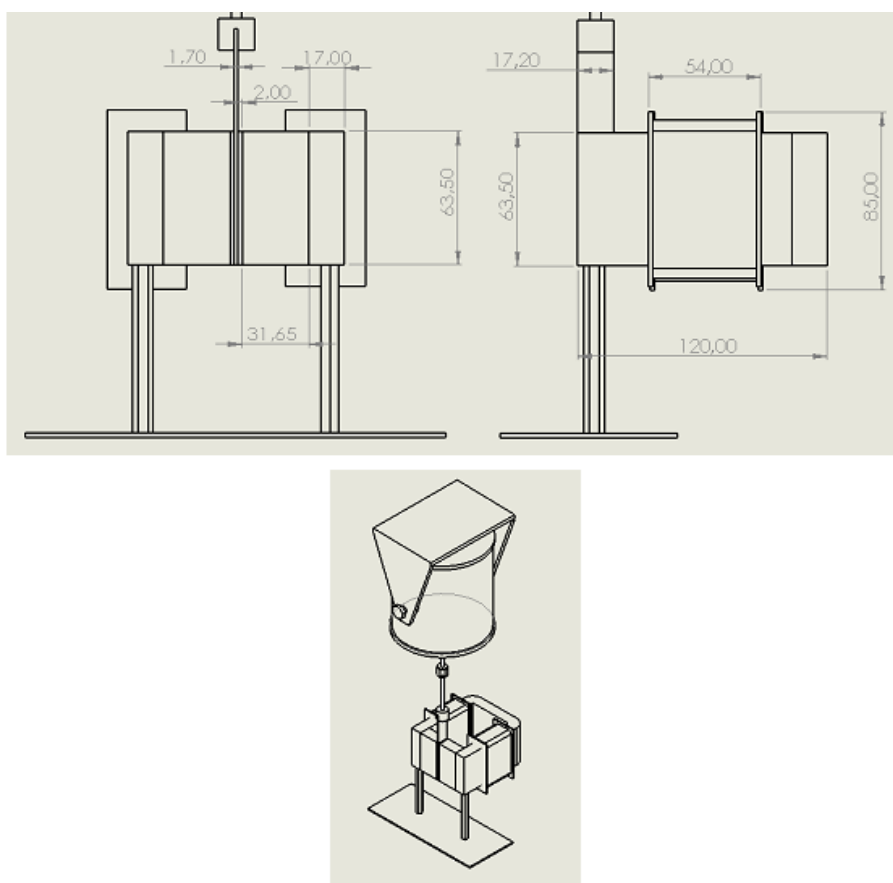
Célula de carga é um transdutor de força. A força é medida de forma indireta, normalmente relacionando-a com a resposta de algum material à aplicação de carga (mudança de pressão, deformação, etc.). É muito utilizada por ser muito precisa e ser muito versátil em relação ao tamanho das cargas aplicadas. Por exemplo, podem ser usadas tanto para medir a tensão em estruturas como pilares e cabos como para balanças de precisão.

Células de carga variam muito dependendo de suas aplicações. Características importantes em uma célula de carga são o modo de operação (tensão e/ou compressão), o ambiente no qual ela pode operar, o intervalo de forças que ela mede, a precisão e a sobrecarga. A sobrecarga (comumente referida como overload) é a carga necessária para que a célula não funcione mais corretamente. O intervalo de forças normalmente é dado em kN. Uma forma de expressar unidades comumente usada é % F.S. (*percent full scale*), a porcentagem do valor máximo que a escala da célula indica, o que não deixa de ser uma unidade de força, figura.

4.5 ESQUEMA DO ELETROÍMÃ UTILIZADO NO MRE.

A figura 30, mostra o desenho técnico do modelo utilizado na bancada experimental onde encontrar o módulo elasticidade para uma situação ótima (equilíbrio) na qual você terá uma relação de frequência e campo magnético para garantir o melhor amortecimento.

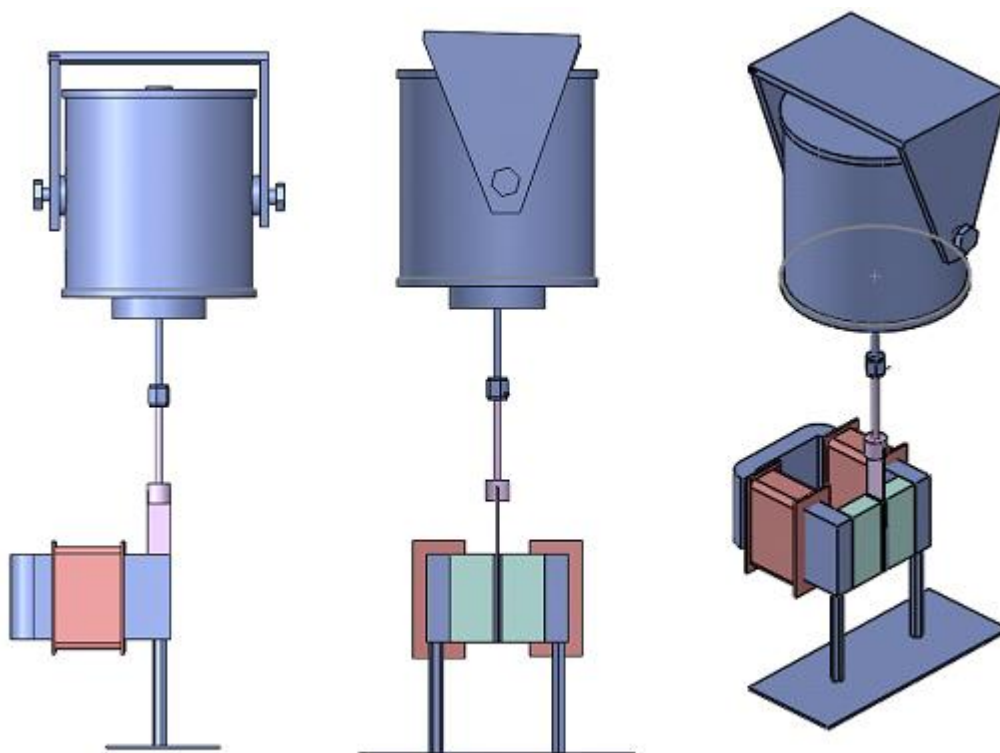
Figura 30 - Desenho técnico do aparato eletroímã.



Fonte: Próprio autor.

A figura 31, demonstra a posição do aparato ensaiado com o posicionamento do shaker.

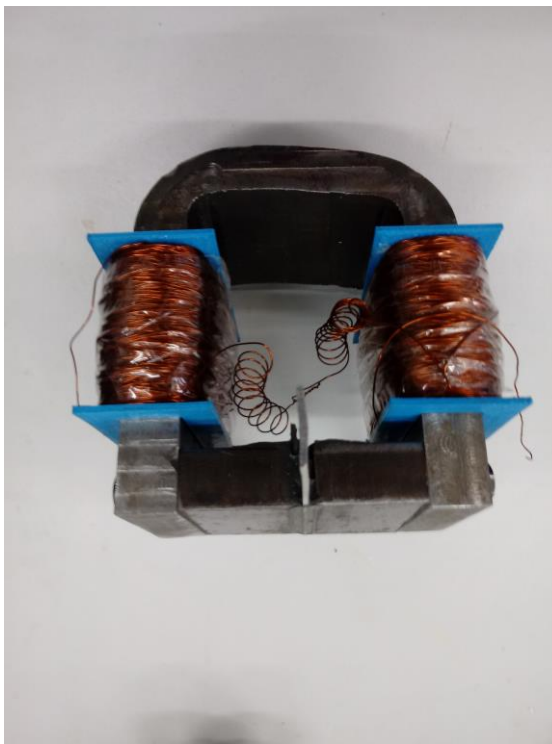
Figura 31 - Figura representativa do aparato ensaiado.



Fonte: Próprio autor.

A figura 32, é uma foto do modelo construído, com as bobinas de cobre já posicionadas, e corpo de prova em posição de ensaio.

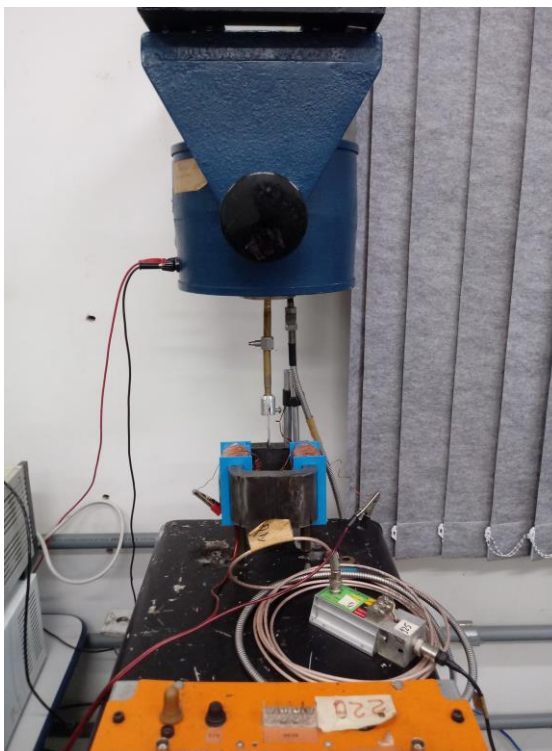
Figura 32 - Foto eletroimã.



Fonte: Próprio autor.

A figura 33, demonstra a posição real do experimento na bancada.

Figura 33 - Imagem da montagem eletroimã mais shaker, utilizando proximetro.

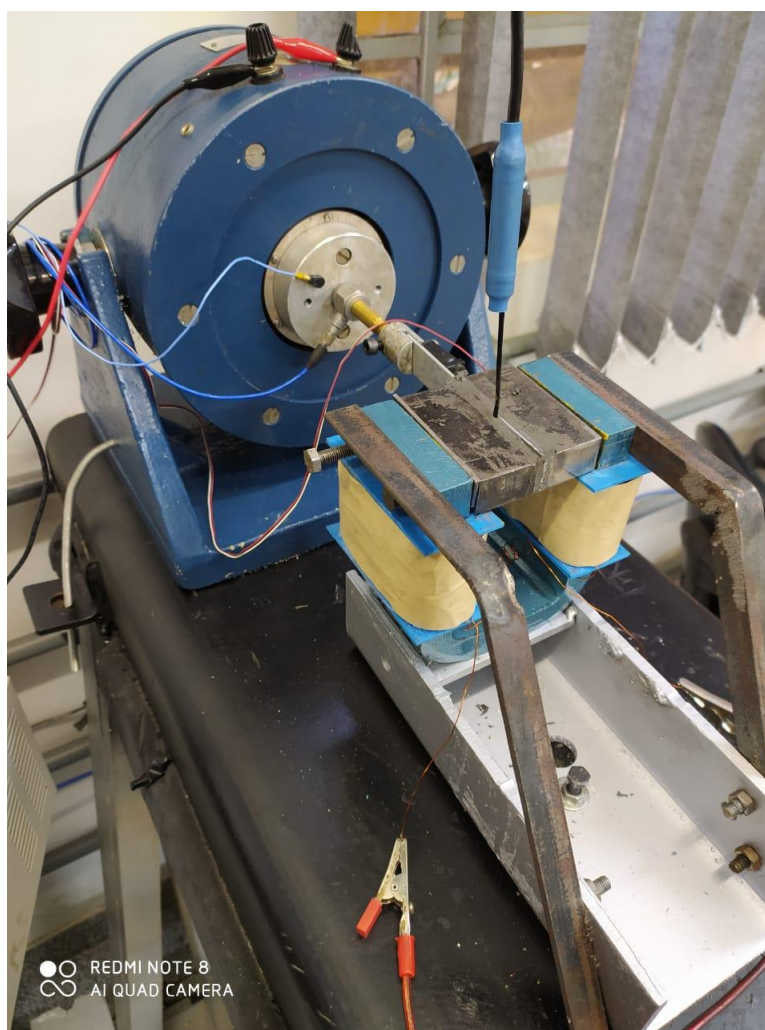


Fonte: Próprio autor.

4.6 APROFUNDANDO ENSAIOS, PERCORRENDO VÁRIAS FREQUÊNCIAS.

Durante o ensaio anterior surgiram dúvidas a respeito que como os resultados se conectavam, pois as frequências escolhidas a princípio eram 50Hz, 100Hz e 300Hz, nessa nova configuração iremos varrer as frequências em intervalos menores e iremos apresentar na secção de resultados, nessa nova configuração iremos substituir o proximetro por um acelerômetro figura 34.

Figura 34 – Imagem da montagem eletroímã mais shaker utilizando acelerômetro.



Fonte: Próprio autor.

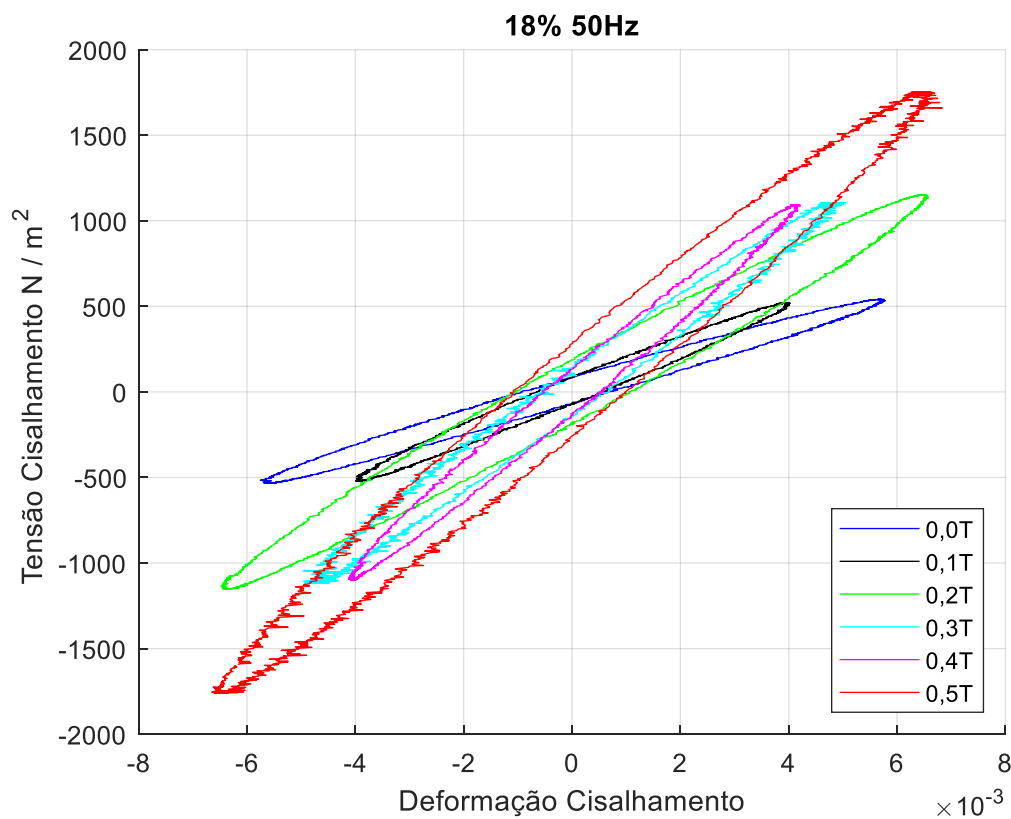
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 ENSAIOS DE CISALHAMENTO

Todas as amostras de elastômero MR foram testadas no estado de equilíbrio, e os dados experimentais foram coletados com o sistema de aquisição. A Figura 35 compara os loops de histerese de tensão de cisalhamento versus deformação de cisalhamento para os elastômeros MR, sob uma variação de campo magnético entre $B = 0$ mT até $B = 0,5$ T. Os principais fatos relevantes desses resultados estão as áreas sob as curvas que representam a energia fornecida na fase de carga e a energia devolvida na fase de descarga, a diferença entre elas corresponde à área compreendida entre as duas linhas; é a chamada histerese e na alteração da inclinação em função do aumento do campo magnético o aumento da área de histerese, note-se que em uma frequência de 50Hz, o corpo de prova de 18% mostra inclinações crescentes do loop de histerese e também várias alterações da área de cada histerese, que, respectivamente, indicam alteração do módulo de elasticidade G' e também do módulo de perda G'' .

Em qualquer amplitude de tensão de cisalhamento, com o aumento da densidade de fluxo magnético B , a área da histerese aumenta, o que indica a diminuição do comportamento elástico, porém os valores do módulo de elasticidade estão aumentando.

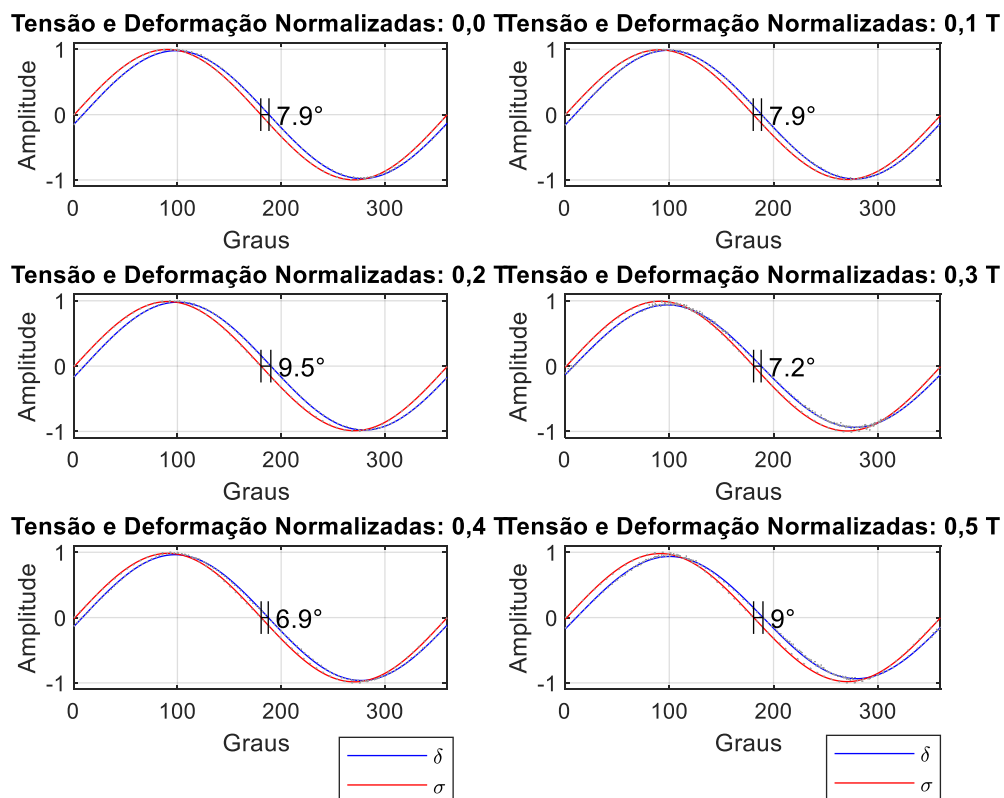
Figura 35 - Loops de histerese de tensão de cisalhamento versus deformação de cisalhamento para 18% sob várias densidades de fluxo magnético a 50Hz.



Fonte: Próprio autor.

A figura 36, mostra o movimento senoidal da força e do deslocamento, sua defasagem mostra o ângulo de fase, através do ângulo de fase, podemos obter o módulo de elasticidade e o fator de perda, assim como observar se o comportamento se aproxima do ideal elástico ou ideal viscoelástico, alteração de até 200% da rigidez, na comparação entre sem campo e máximo campo.

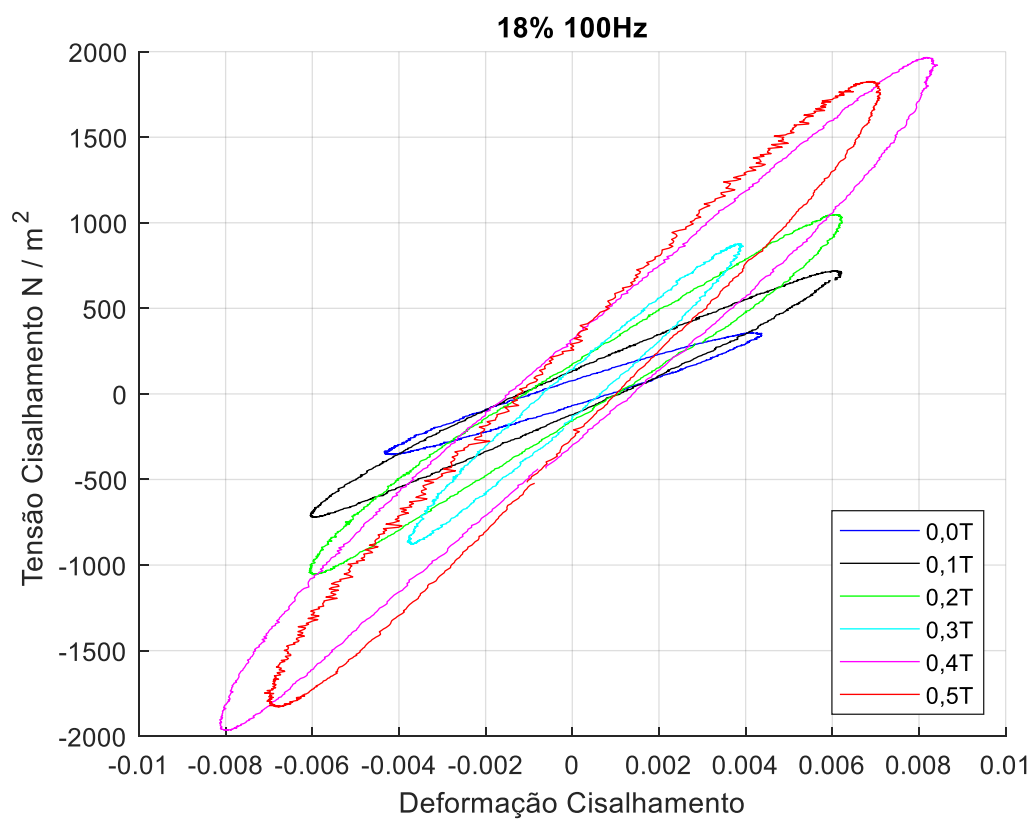
Figura 36 - Ângulo de fase, 18% a 50Hz.



Fonte: Próprio autor.

Em uma frequência de 100Hz, figura 37, o corpo de prova de 18% mostra várias inclinação crescentes do loop de histerese, comparada com a de 50Hz este reforça o comportamento visto nesta frequência de 100Hz, que respectivamente, indicam um aumento do modulo de elasticidade G' , porem ainda apresentam um comportamento de aumentar a área de histerese ou seja uma redução do comportamento elástico, conforme se aproximam do campo magnético de 0,5T e também um módulo de perda maior G'' . Este resultado significa que a carga de 18% a 100Hz em massa é próxima a rigidez de 50Hz, e se aproxima de um comportamento elástico, alteração de 200% da rigidez na comparação entre sem campo e máximo campo.

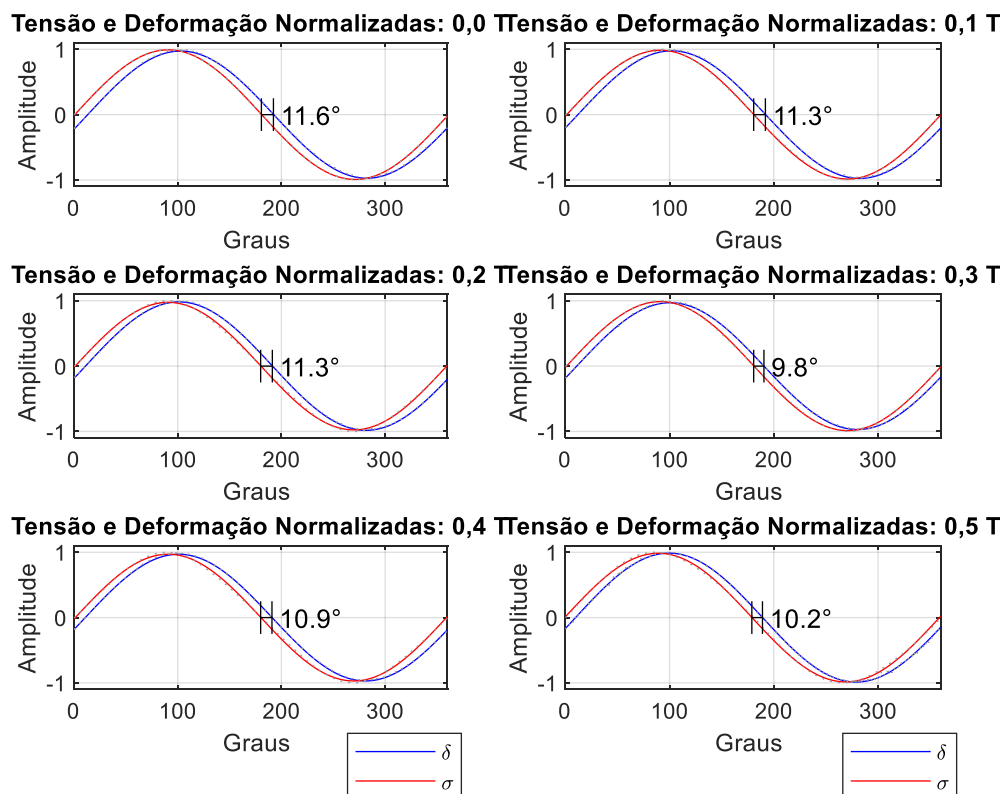
Figura 37 - Loops de histerese de tensão de cisalhamento versus deformação de cisalhamento para 18% sob várias densidades de fluxo magnético a 100Hz.



Fonte: Próprio autor.

Na figura 38, observamos ângulos de fase maiores, ou seja, apresenta um comportamento viscoelástico.

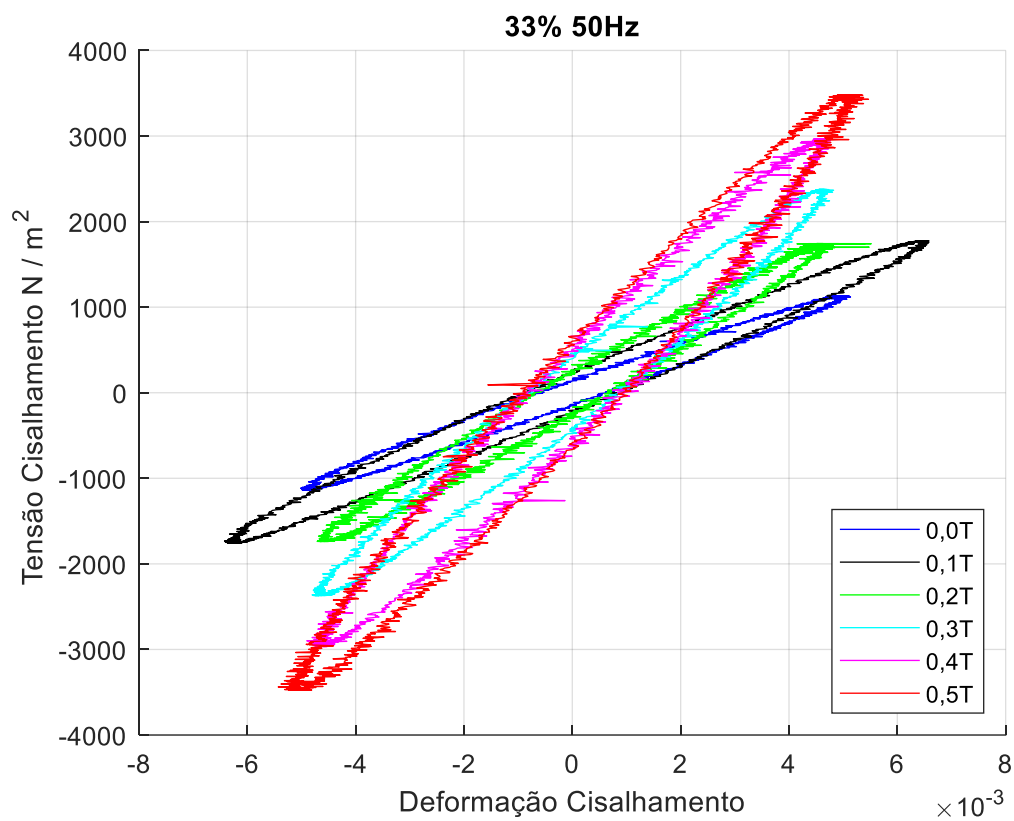
Figura 38 - Ângulo de fase, 18% a 100Hz.



Fonte: Próprio autor.

Na frequência de 50Hz, o corpo de prova de 33% mostra várias inclinações crescentes do loop de histerese da tensão e também possui uma área maior de histerese, conforme a intensidade do campo magnético é aumentada, que respectivamente, indicam um módulo de elasticidade mais alto G' e também um módulo de perda maior G'' . Este resultado significa que a carga de 33% a 50Hz se aproxima de um comportamento viscoelástico, em relação ao campo magnético, esse fenômeno prova que o corpo de prova de 33% tem um efeito claro de MR, porque ambos módulos de elasticidade e perda aumentam com o aumento força do campo magnético, figura 39, alteração de 200% da rigidez.

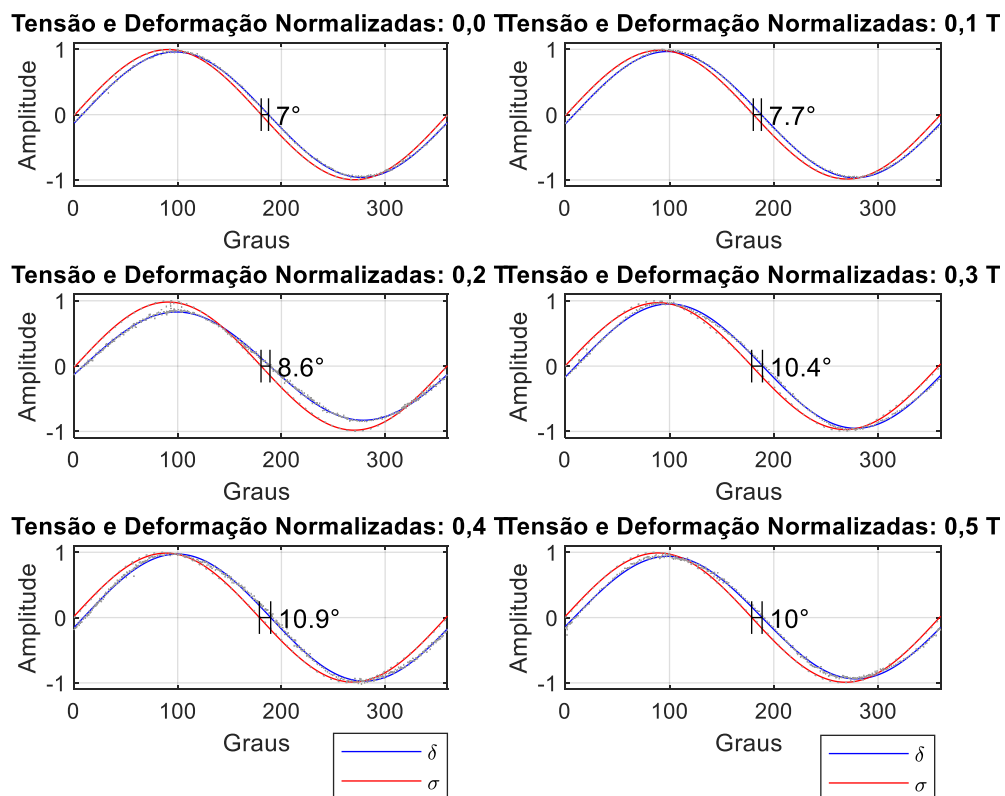
Figura 39 - Loops de histerese de tensão de cisalhamento versus deformação de cisalhamento para 33% sob várias densidades de fluxo magnético a 50Hz.



Fonte: Próprio autor.

Os ângulos de fase mostrados na figura 40, possuem uma defasagem próxima de 0 graus.

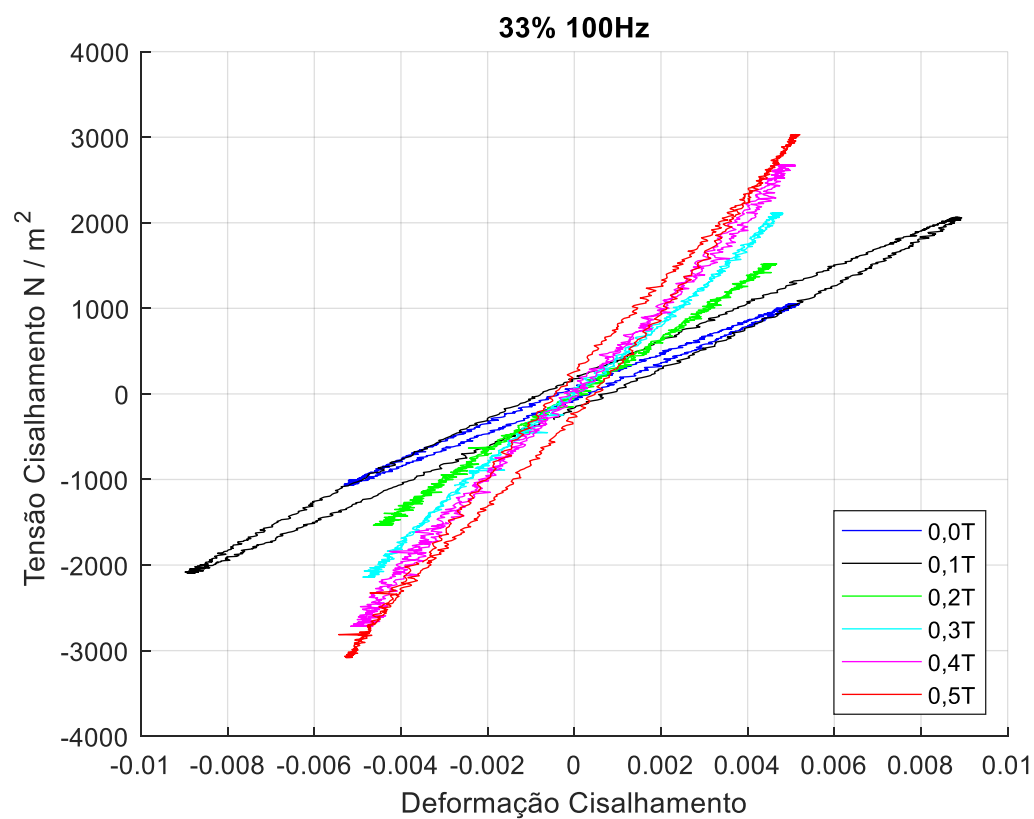
Figura 40 - Ângulo de fase, 33% a 50Hz.



Fonte: Próprio autor.

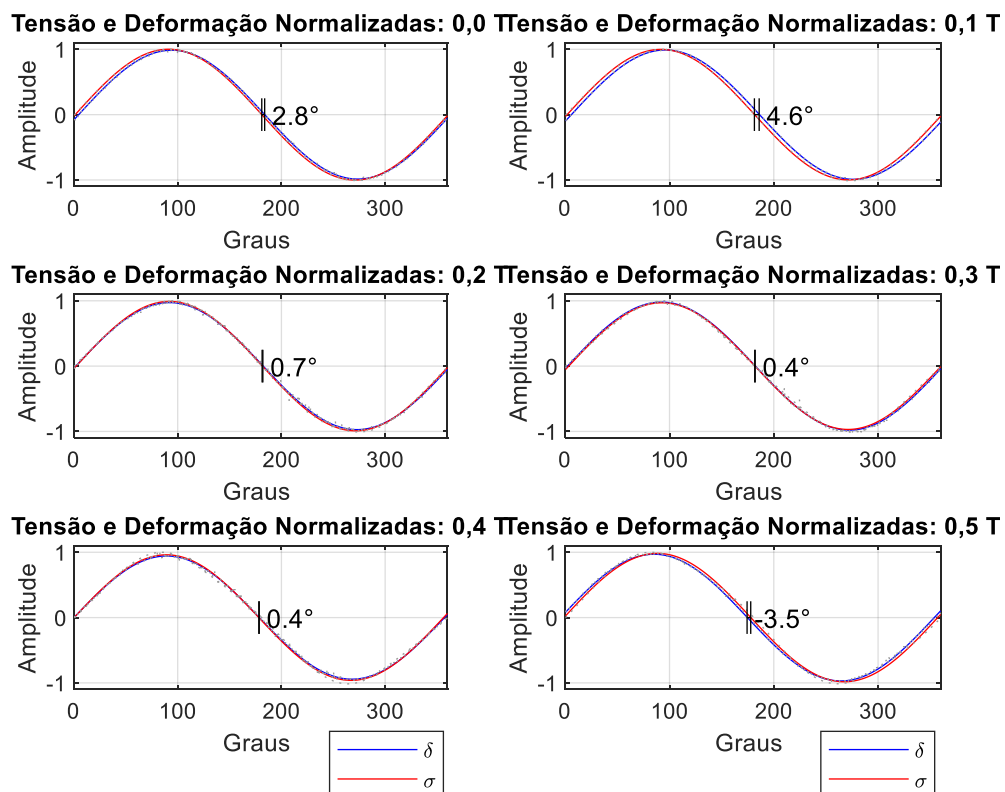
Na figura 41, que em qualquer amplitude de tensão de cisalhamento, com o aumento da densidade de fluxo magnético B , a inclinação da tensão aumenta, o que indica o aumento do módulo de elasticidade G' . Enquanto isso, quando a densidade de fluxo magnético B tem um valor mais alto, alteração de 250% da rigidez.

Figura 41 - Loops de histerese de tensão de cisalhamento versus deformação de cisalhamento para 33% sob várias densidades de fluxo magnético a 100Hz.



Na figura 42, que o comportamento se aproxima do ideal elástico.

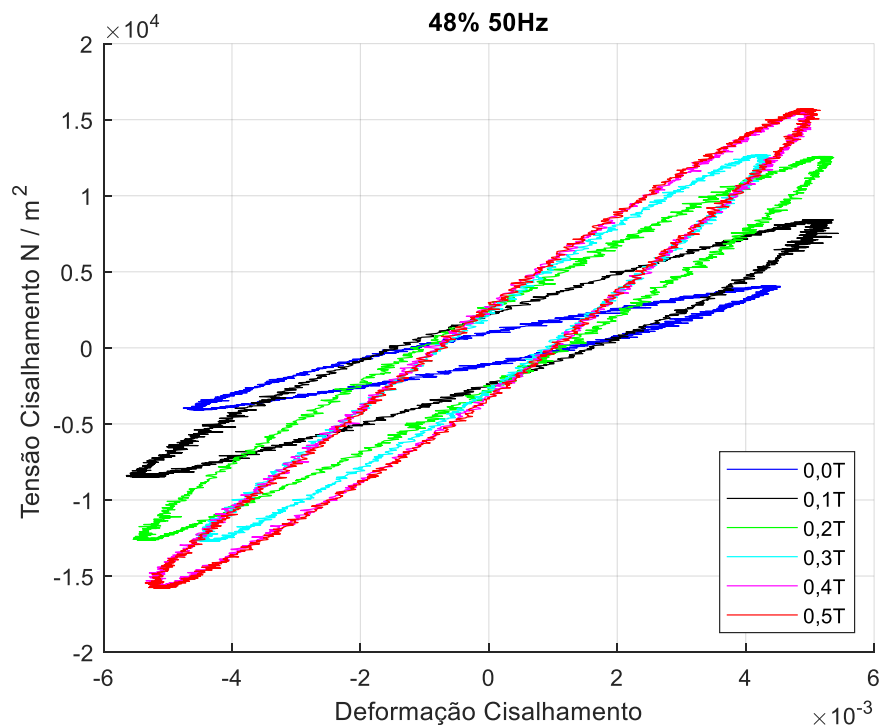
Figura 42 - Ângulo de fase, 33% a 100Hz.



Fonte: Próprio autor.

Na figura 43, qualquer amplitude de tensão de cisalhamento, com o aumento da densidade de fluxo magnético B , a inclinação da tensão aumenta, o que indica a aumento do módulo de elasticidade G' . Enquanto isso, quando a densidade de fluxo magnético B tem um valor mais alto, a área do ciclo de histerese aumentou, o que indica aumento do módulo de perda G'' .

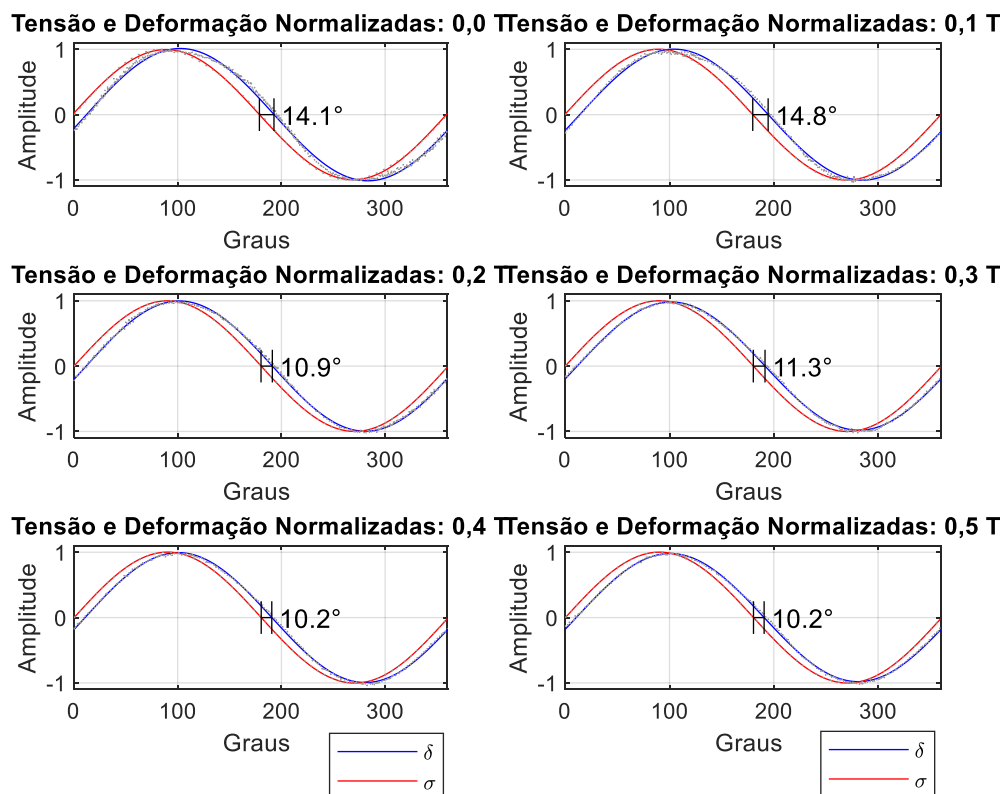
Figura 43 - Loops de histerese de tensão de cisalhamento versus deformação de cisalhamento para 48% sob várias densidades de fluxo magnético a 50Hz.



Fonte: Próprio autor.

Na figura 44, o MRE apresenta um comportamento viscoelástico.

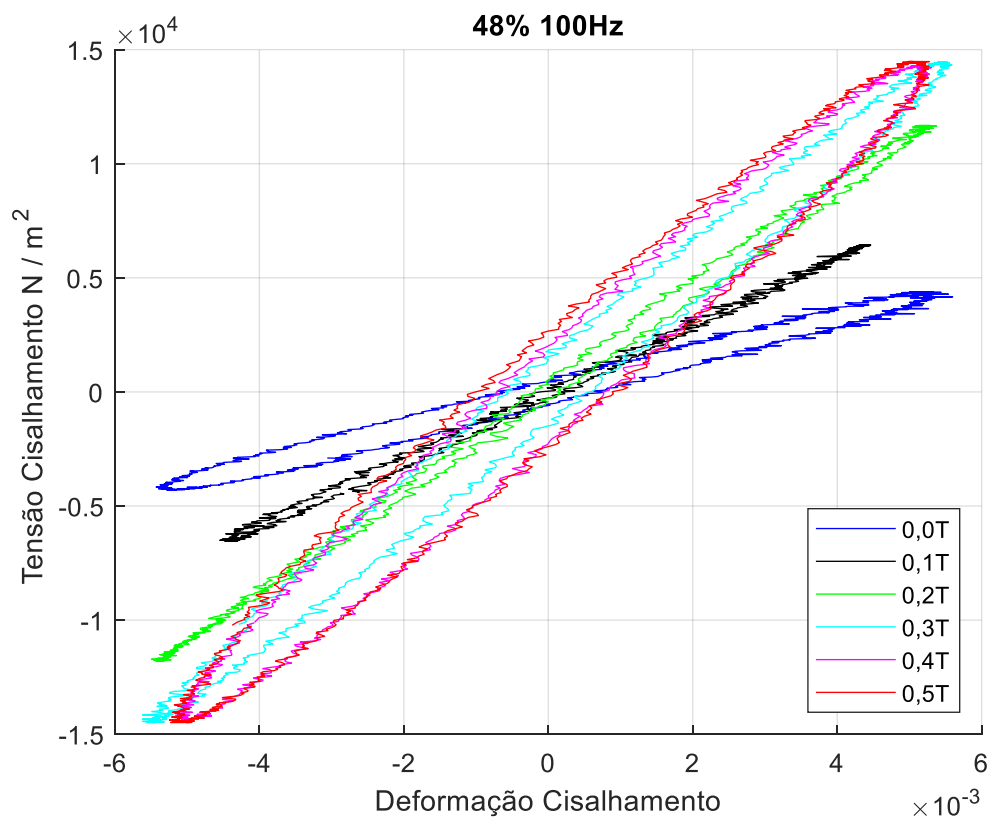
Figura 44 - Ângulo de fase, 48% a 50Hz.



Fonte: Próprio autor.

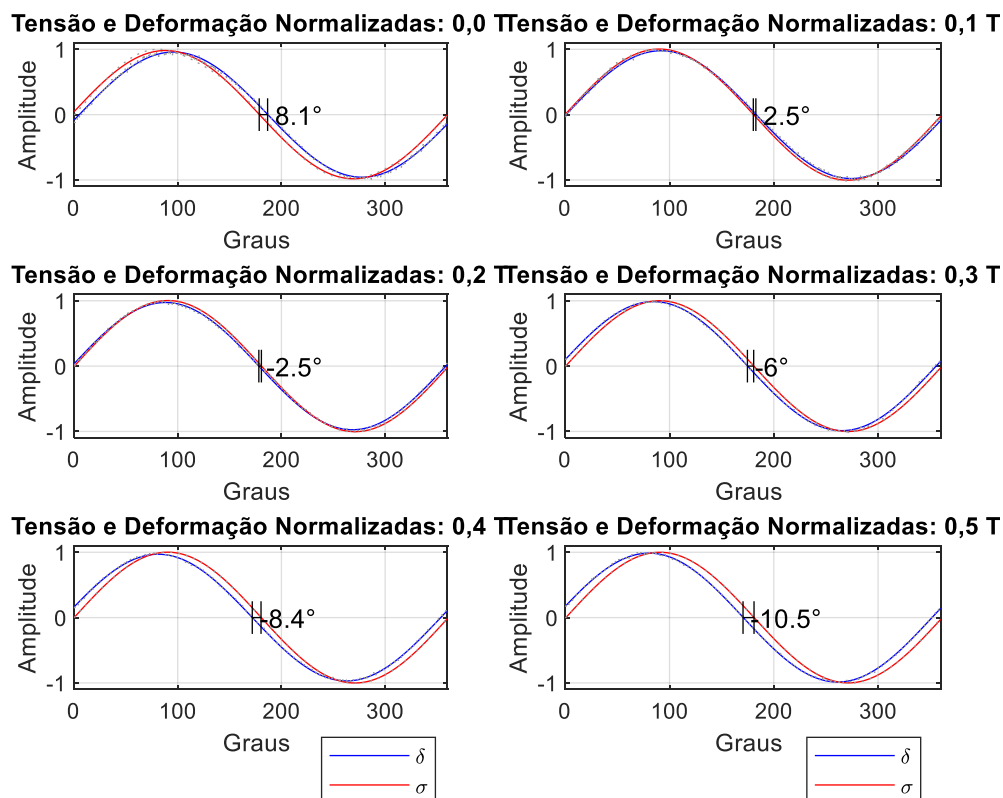
Em uma frequência de 100Hz, figura 45, o corpo de prova de 48% apresenta uma característica limitante, em seu ciclo histórico, mostra uma inclinação amortecida do loop da tensão, porém para os campos de 0,3; 0,4 e 0,5 T sua inclinação se manteve, devido sua constituição em massa de ferro carbonila, sua rigidez estrutural é mais alta comparada com a de 18% e 33%, alteração de 250% da rigidez.

Figura 45 - Loops de histerese de tensão de cisalhamento versus deformação de cisalhamento para 48% sob várias densidades de fluxo magnético a 100Hz.



Na figura 46, o MRE apresenta um comportamento viscoelástico.

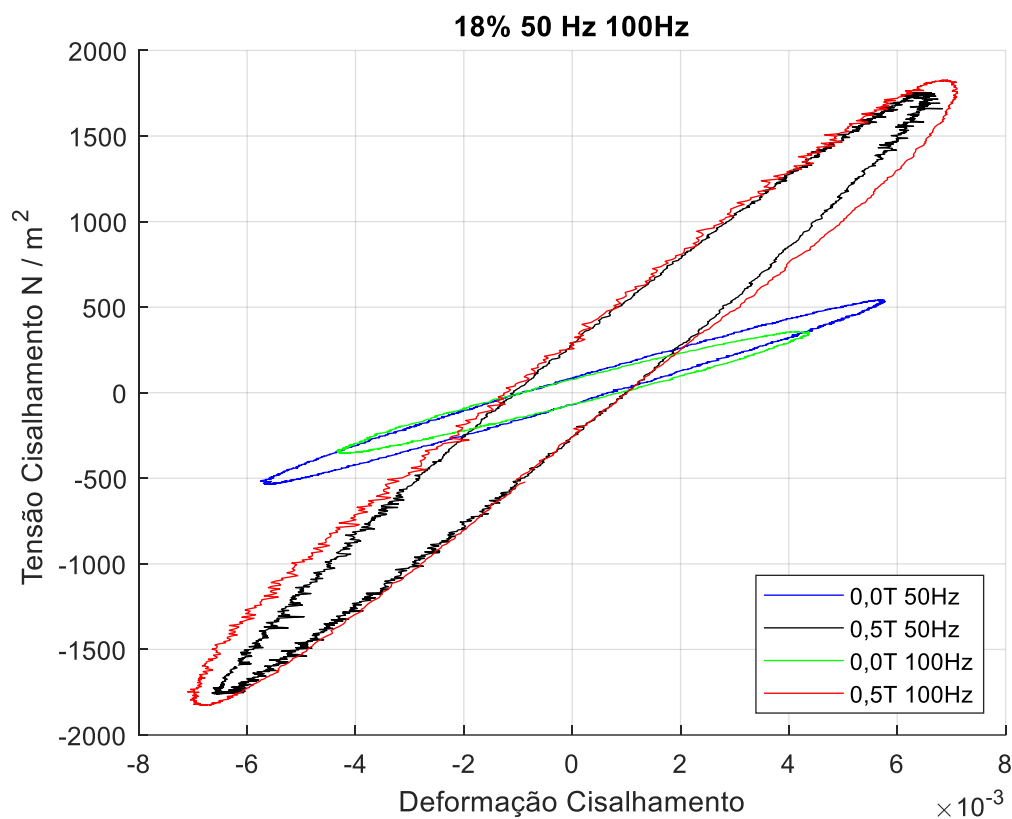
Figura 46 - Ângulo de fase, 48% a 100Hz.



Fonte: Próprio autor.

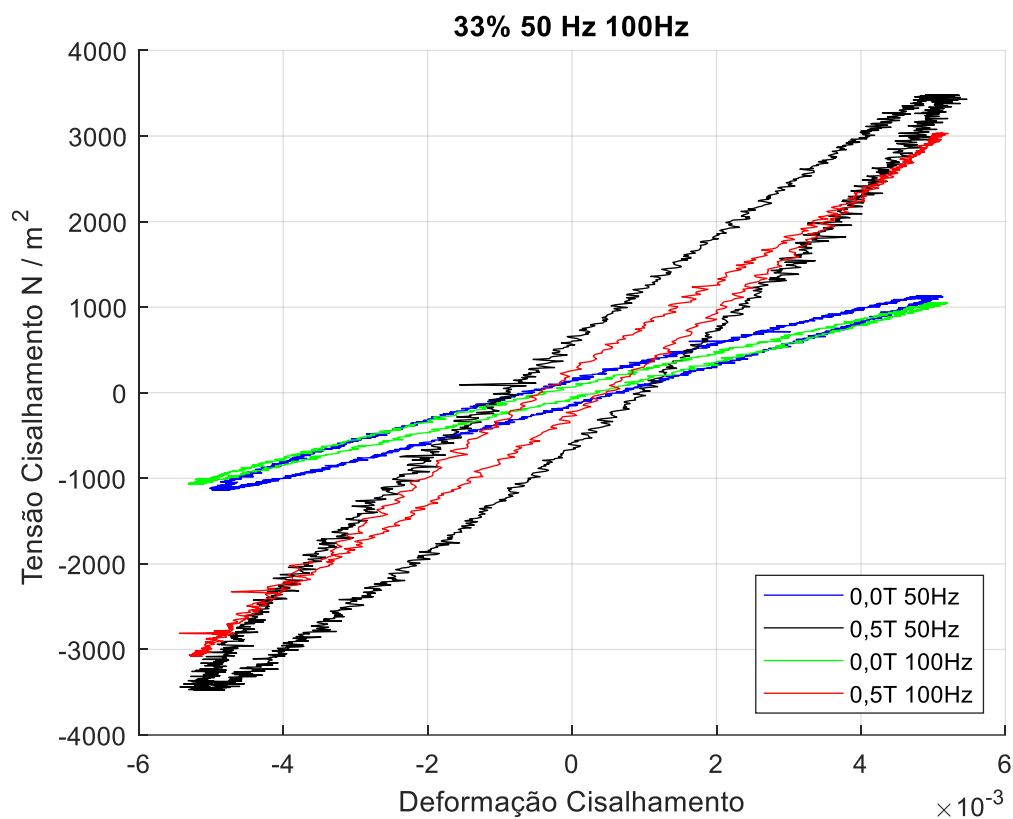
Em uma comparação de frequências entre 50Hz e 100Hz, o corpo de prova de 18% apresenta uma propriedade interessante que é uma medida da aptidão da borracha para restituir, quando da recuperação elástica, a energia que lhe provocou a deformação. Quanto maior for a resiliência, maior é a quantidade de energia restituída. É habitual também dizer-se que é maior a elasticidade da borracha, quanto maior é a histerese, menor é a resiliência. conforme o ciclo de histerese acontece, para sem campo até 0,5T, sua inclinação se manteve, devido sua constituição em massa de ferro carbonila, sua rigidez estrutural é mais baixa comparada com a de 48% e 33%, sua rigidez se manteve constante, figura 47.

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.



Na figura 48, comparativo entre com campo 0,5T e sem campo 0,0T, para as frequências de 50Hz e 100Hz, o corpo de prova de 33%.

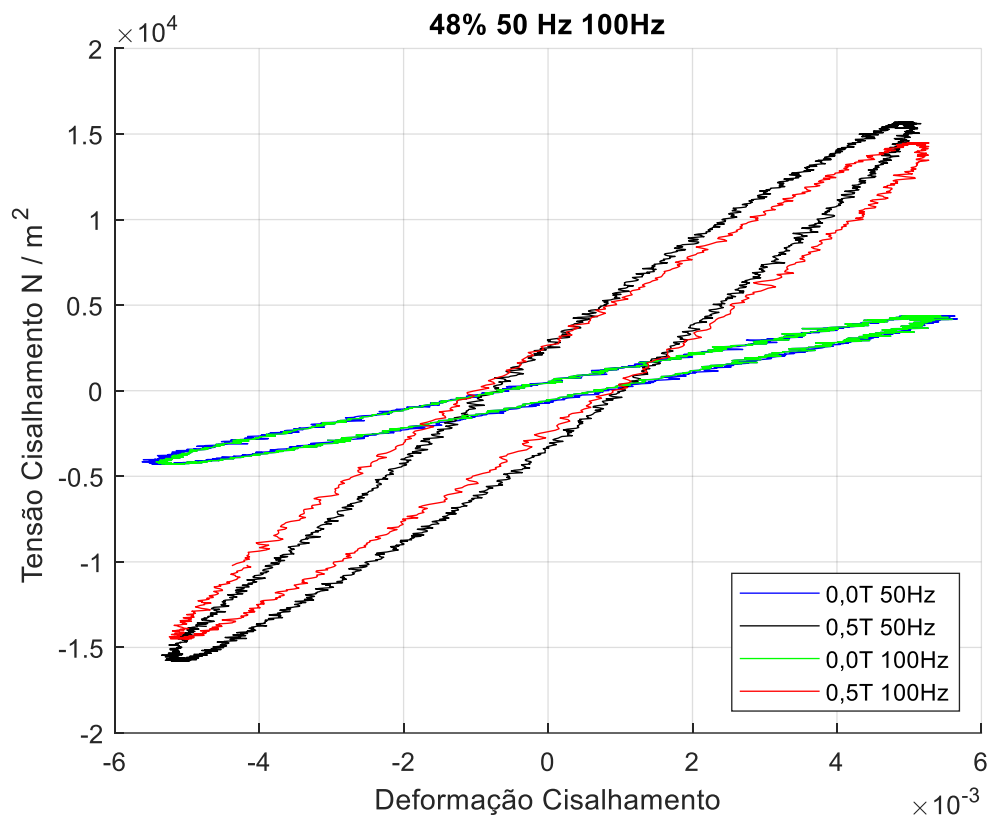
Figura 48 - Loops de histerese de tensão de cisalhamento versus deformação de cisalhamento para 33% sob densidade de 0,0T e 0,5T de fluxo magnético e várias frequências.



Fonte: Próprio autor.

Na figura 49, comparativo entre com campo 0,5T e sem campo 0,0T, para as frequências de 50Hz e 100Hz, o corpo de prova de 48%.

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.

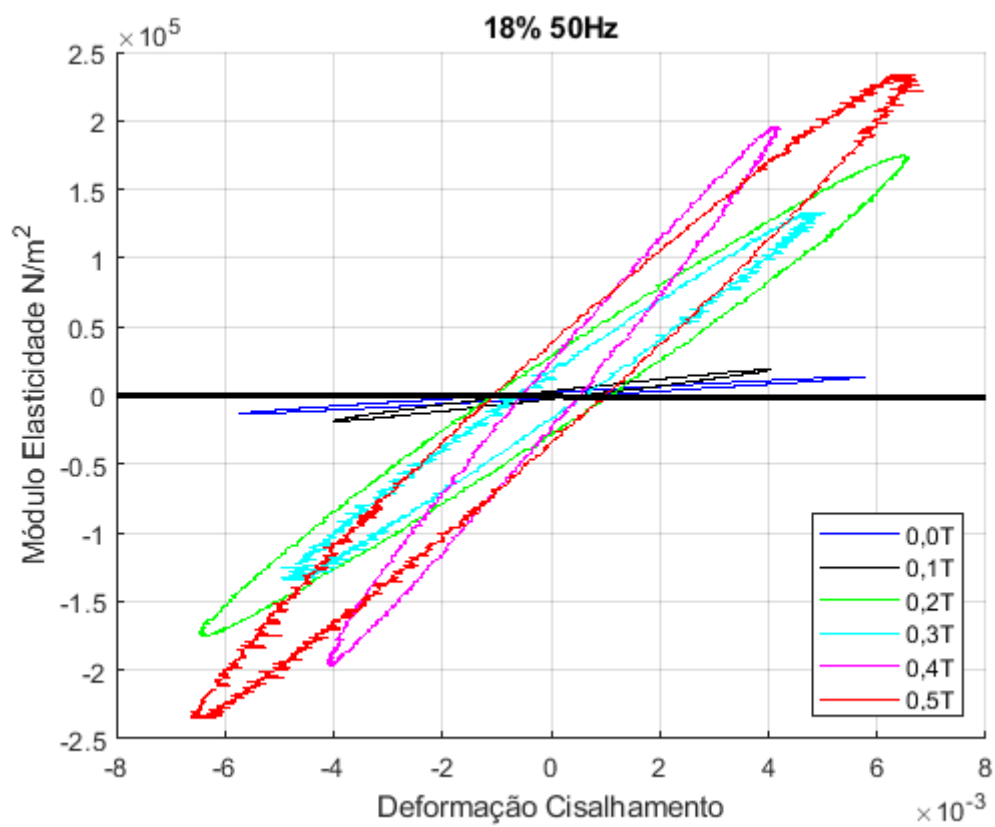


Fonte: Próprio autor.

5.2 RESULTADOS DOS MÓDULOS DE ELASTICIDADE.

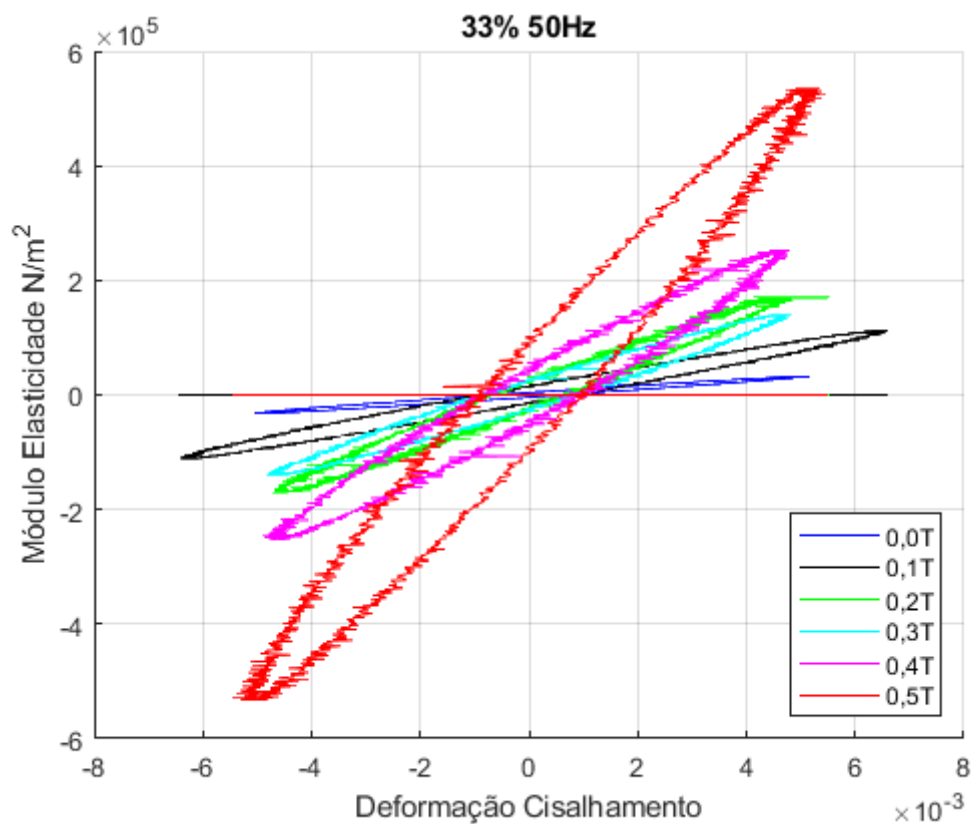
Na figura 50, loops de módulos de elasticidade versus deformação de cisalhamento para 18% sob densidade de 0,0T; 0,1T; 0,2T; 0,3T; 0,4T e 0,5T em uma frequência de 50Hz..

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.



Fonte: Próprio autor.

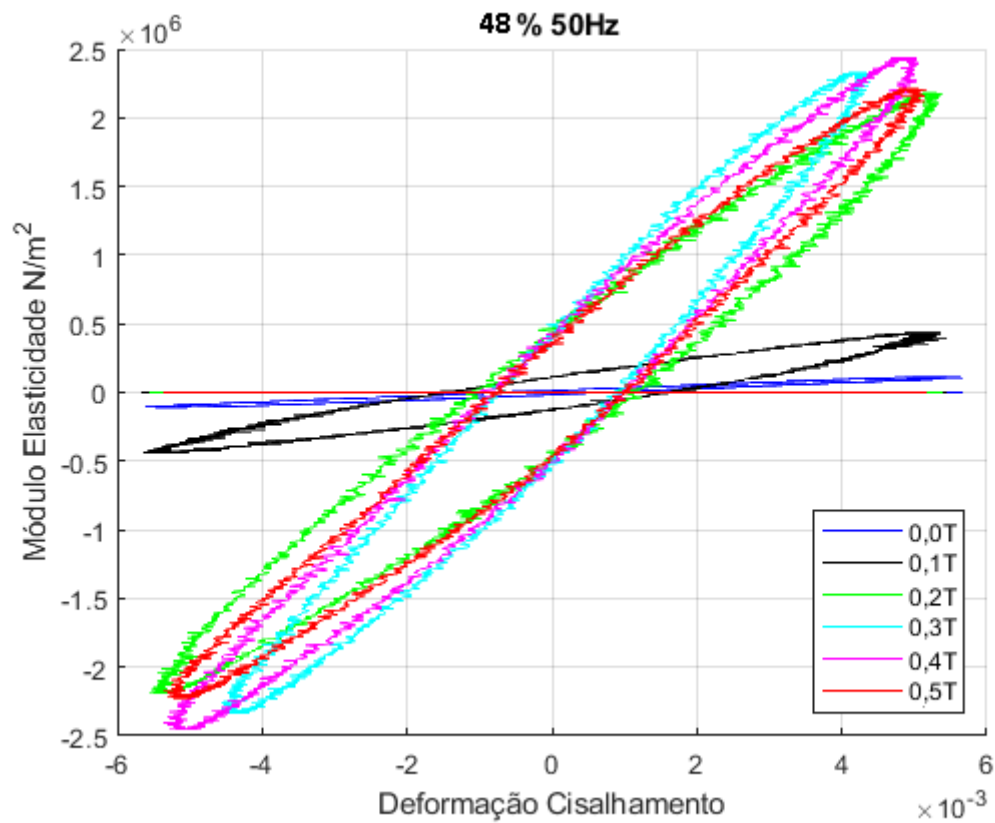
Figura 51 - Loops de módulos de elasticidade versus deformação de cisalhamento para 33% sob densidade de 0,0T, 0,1T, 0,2T, 0,3T, 0,4T e 0,5T; em uma frequência de 50Hz.



Fonte: Próprio autor.

Na figura 61, 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 e uma frequência de 50Hz.

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.

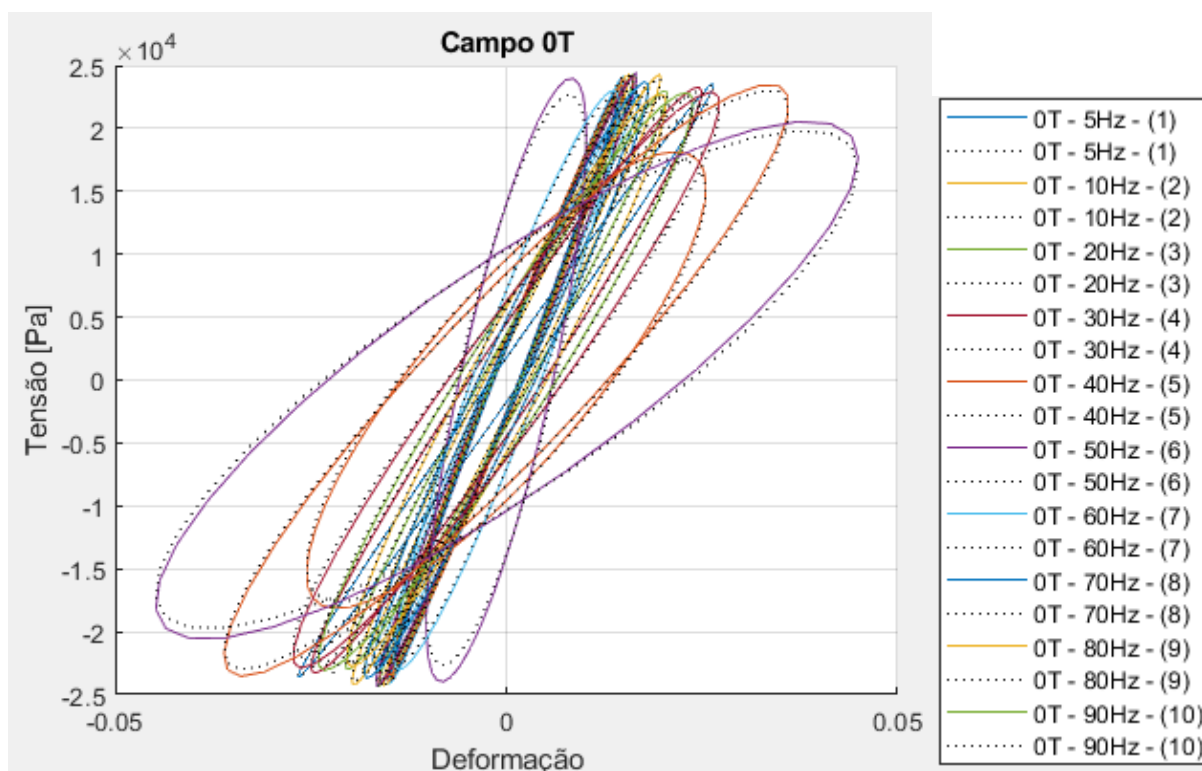


Fonte: Próprio autor.

5.3 RESULTADOS PARA A CONFIGURAÇÃO DE 33% PARA FREQUÊNCIAS ENTRE 5HZ ATÉ 100HZ.

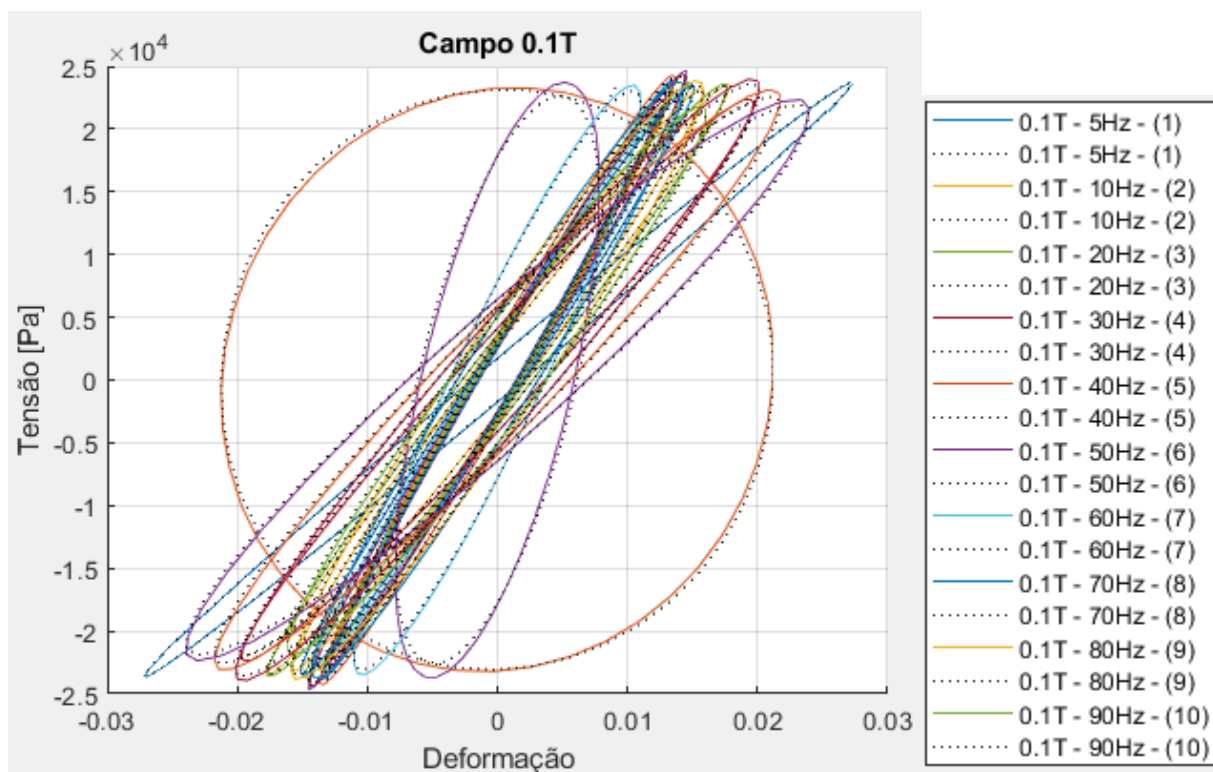
A figura 53 é o resultado dos ensaios de varredura em baixas frequências e altas frequências em busca que aperfeiçoar o estudo do comportamento do MRE.

Figura 53 - Loops de histerese de tensão de cisalhamento versus deformação de cisalhamento para 33% sem campo magnético, sob várias frequências.



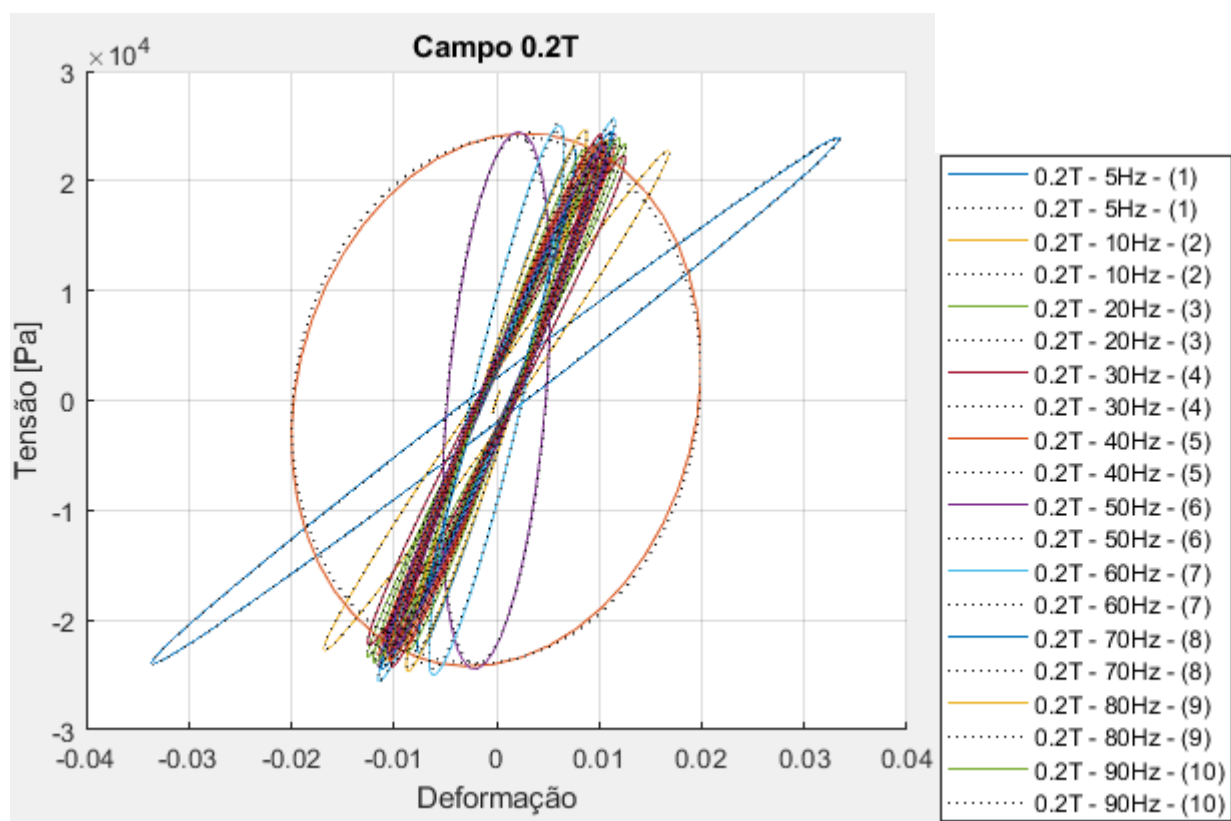
Fonte: Próprio autor.

Figura 54 - Loops de histerese de tensão de cisalhamento versus deformação de cisalhamento para 33% com 0,1T de campo magnético sob várias frequências.



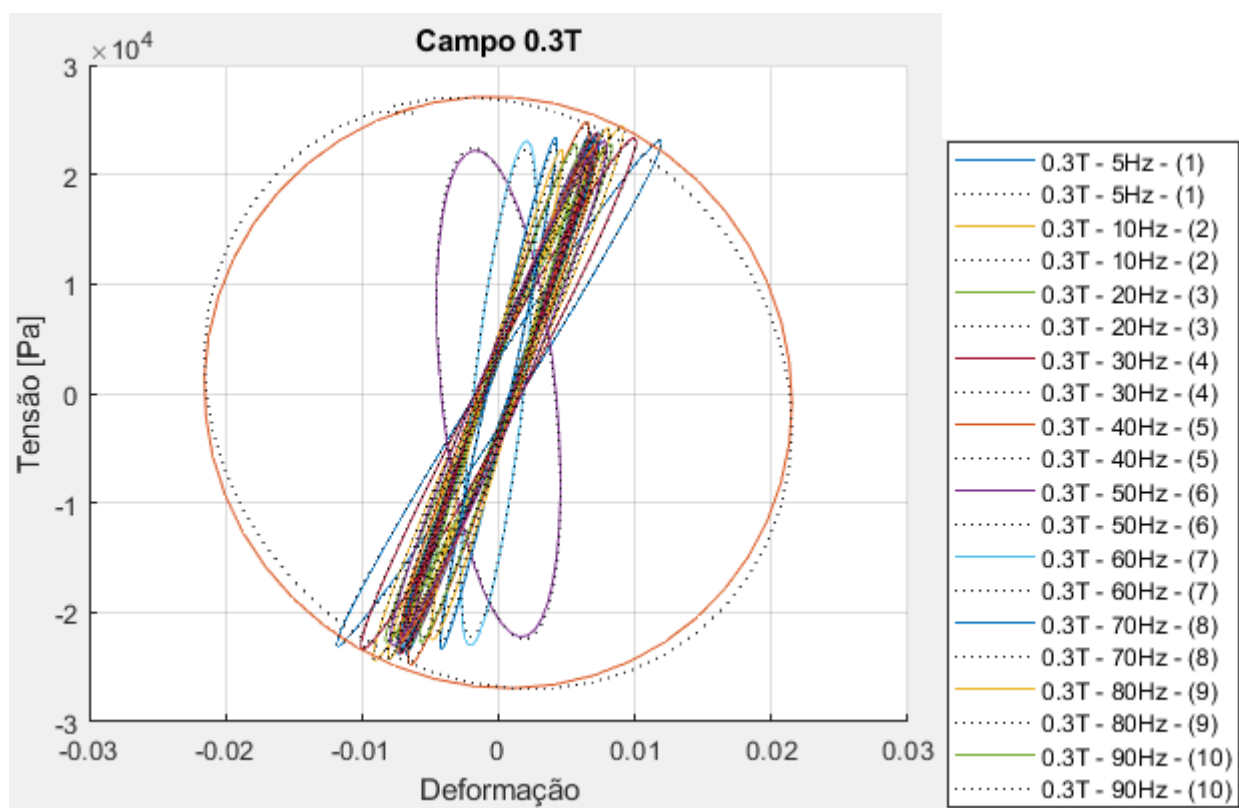
Fonte: Próprio autor.

Figura 55 - Loops de histerese de tensão de cisalhamento versus deformação de cisalhamento para 33% com 0,2T de campo magnético sob várias frequências.



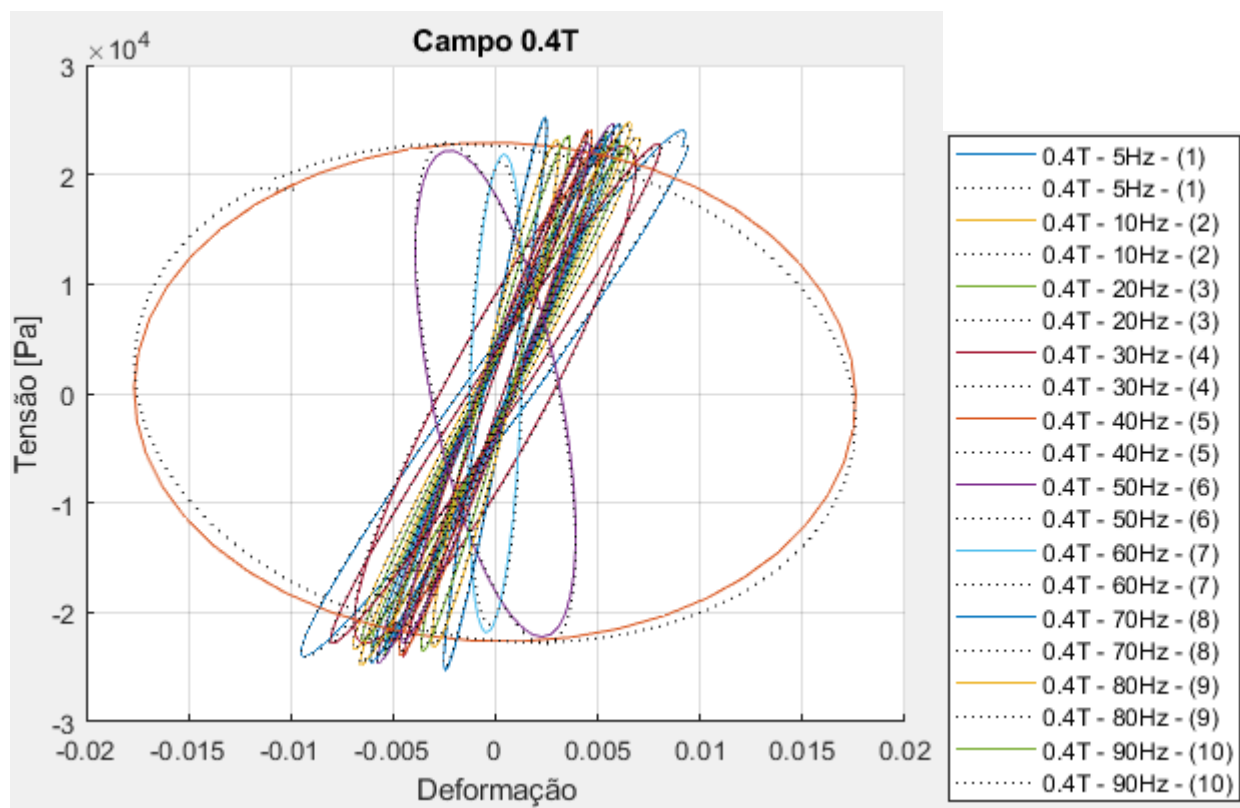
Fonte: Próprio autor.

Figura 56 - Loops de histerese de tensão de cisalhamento versus deformação de cisalhamento para 33% com 0,3T de campo magnético sob várias frequências.



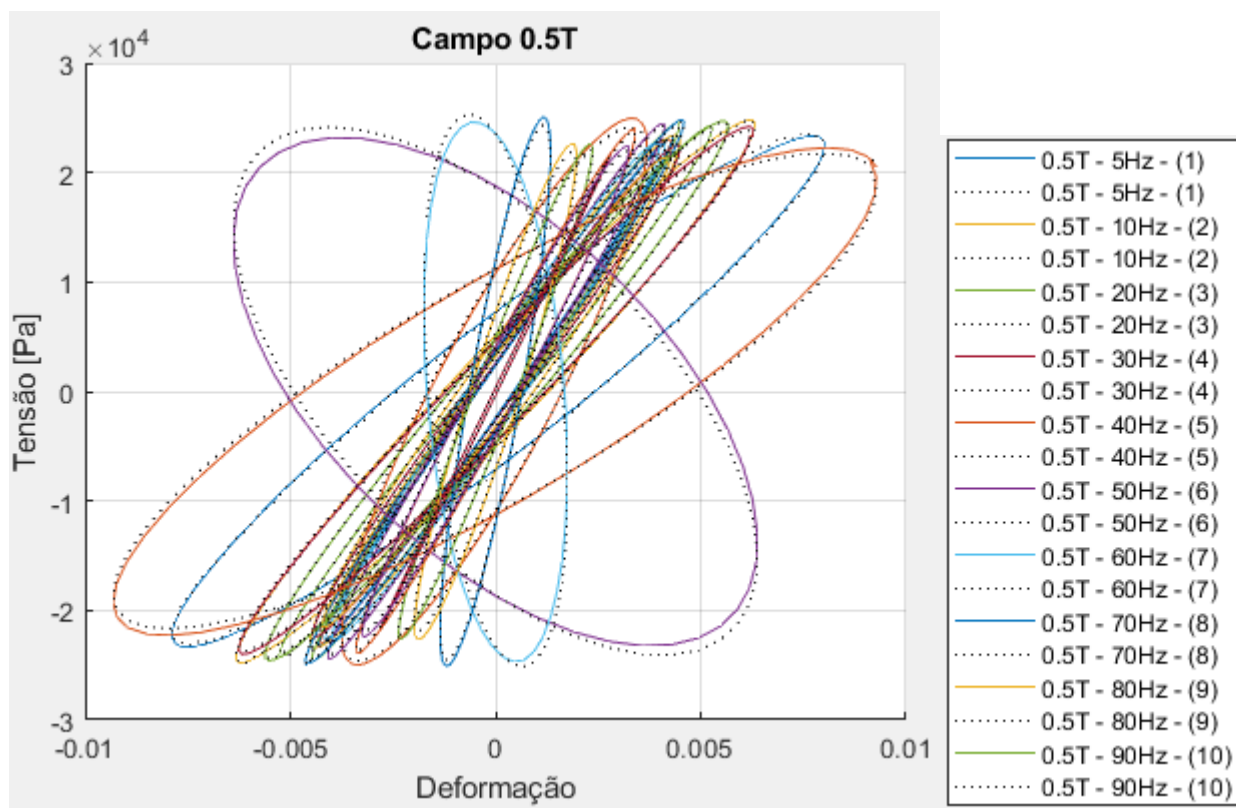
Fonte: Próprio autor.

Figura 57 - Loops de histerese de tensão de cisalhamento versus deformação de cisalhamento para 33% com 0,4T de campo magnético sob várias frequências.



Fonte: Próprio autor.

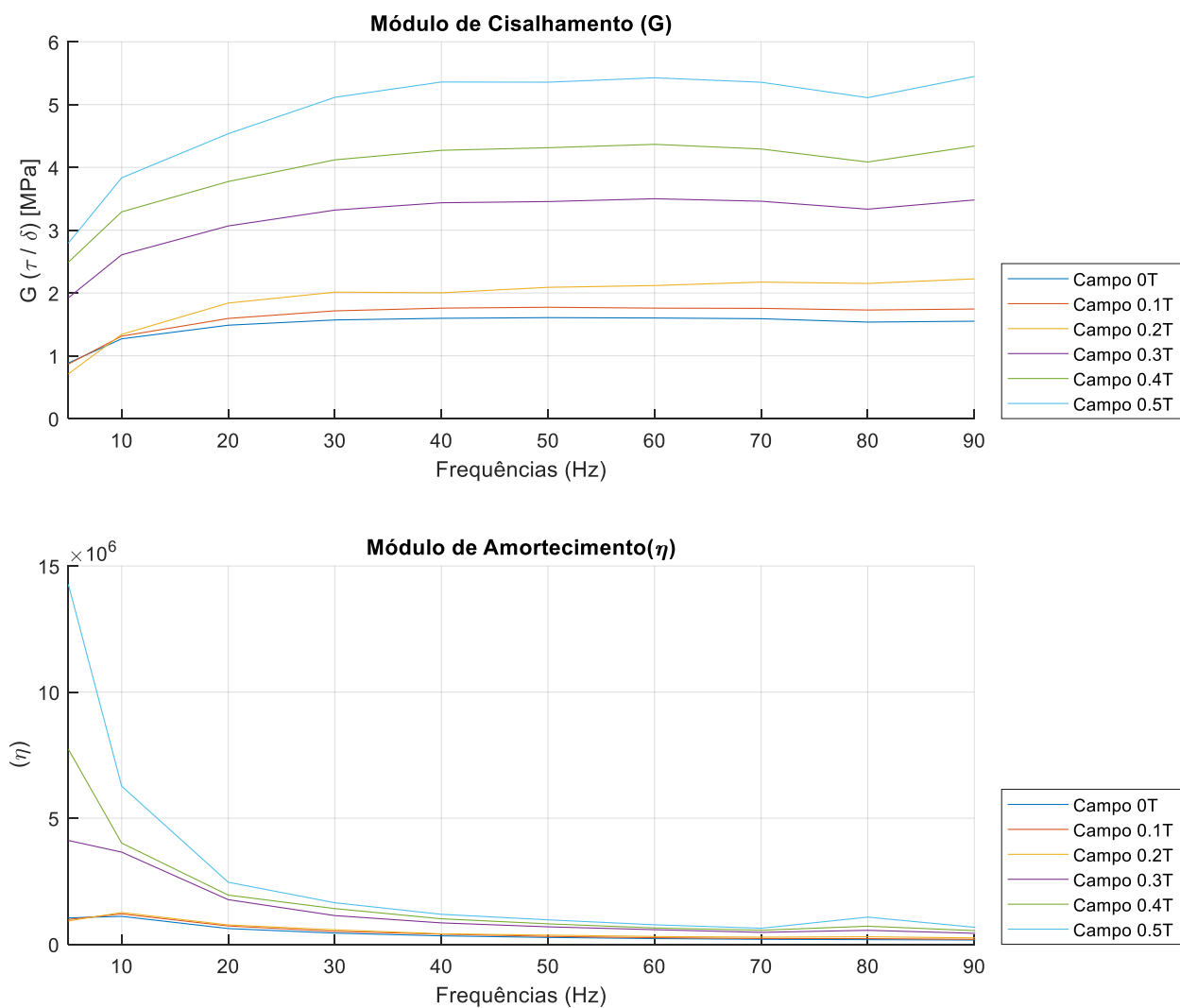
Figura 58 - Loops de histerese de tensão de cisalhamento versus deformação de cisalhamento para 33% com 0,5T de campo magnético sob várias frequências.



Fonte: Próprio autor.

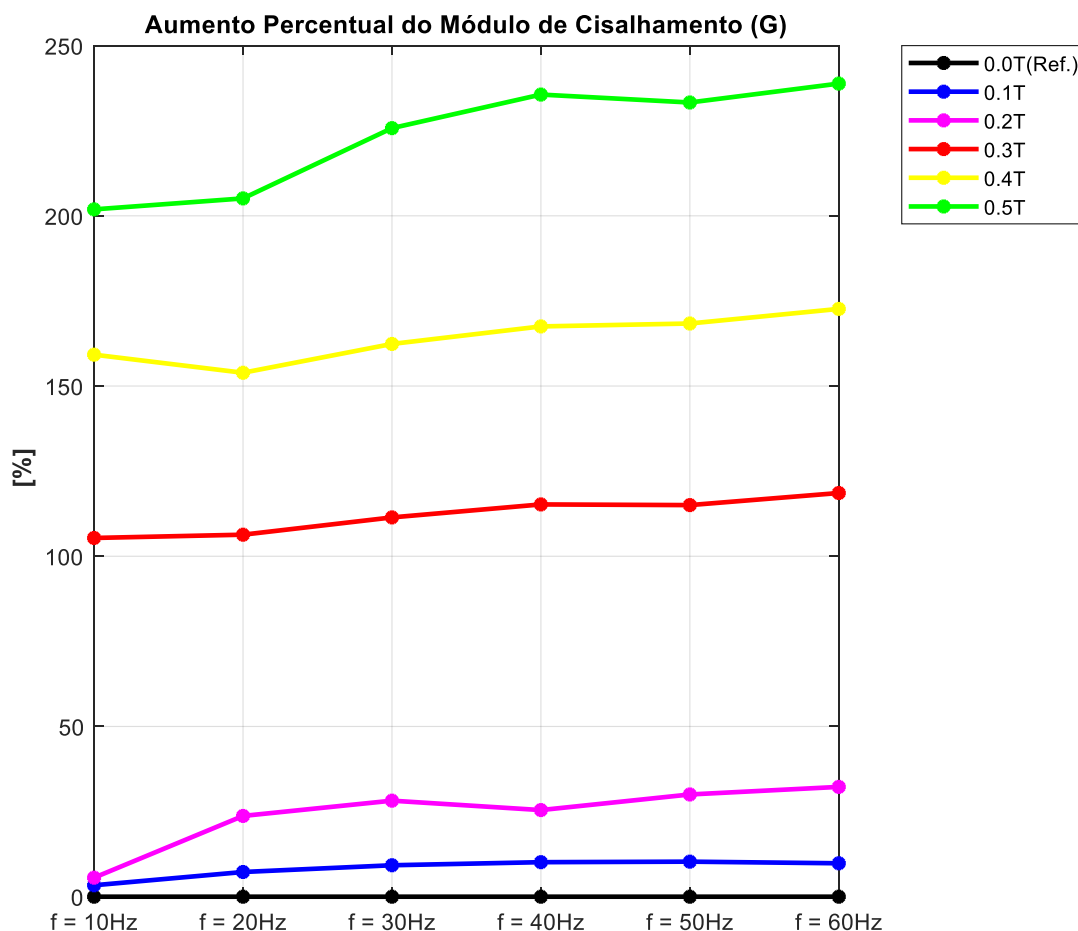
A figura 59 apresenta os calculos utilizando o modelo de kelvin voight para caracterizar o material, tirar amortecimento e modulo de cisalhamento (CARVALHO, 2020).

Figura 59 - Visualização do módulo de cisalhamento e Amortecimento de 33%.



Fonte: Próprio autor.

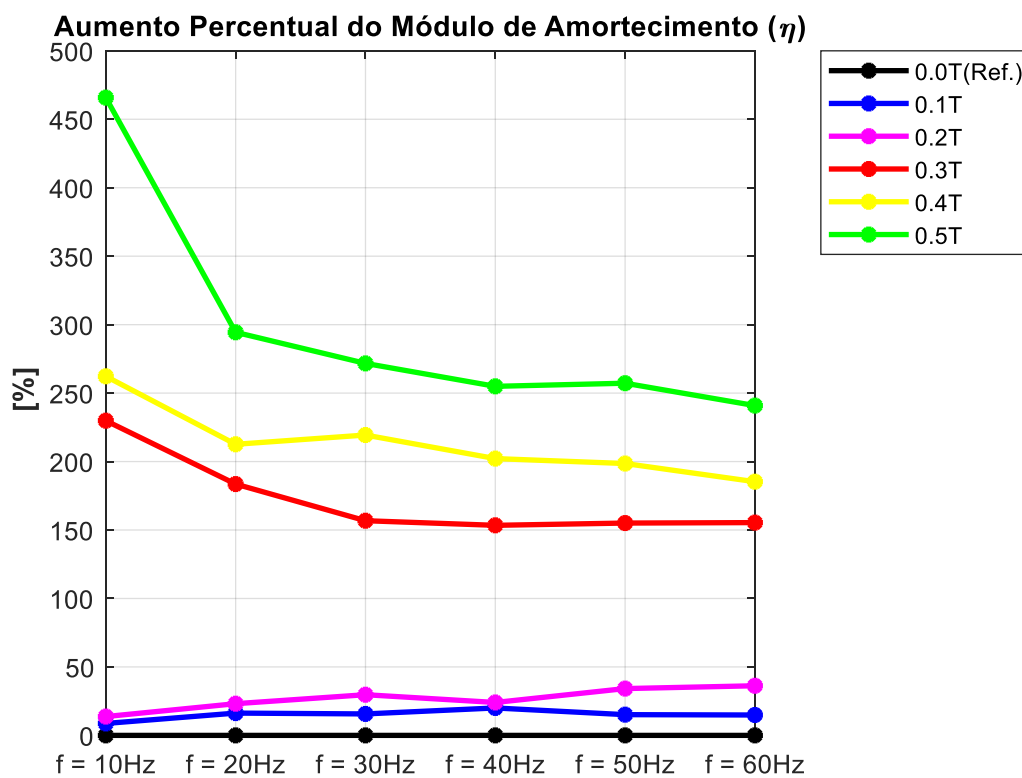
Figura 60 - Comparação do percentual do módulo de Cisalhamento.



Fonte: Próprio autor.

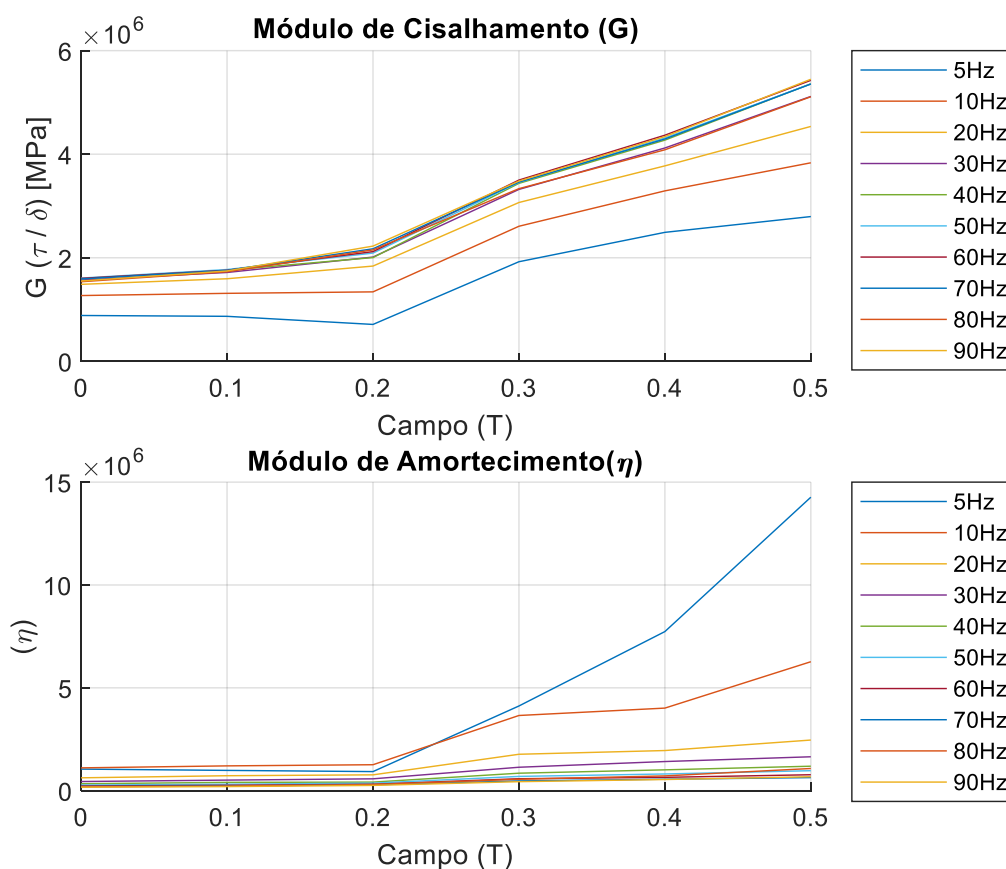
Nos gráficos apresentados do módulo de elasticidade, temos uma boa comparação do potencial do MRE, temos muitos comportamentos a serem analisados conforme a frequência é alterada e principalmente o comportamento da histerese de cada carga e descarga, isso fica mais evidente apresentada na figura 61, onde temos uma comparação importante do amortecimento em determinadas frequências, resultados que estimulam a continuação da pesquisa e aplicação desse material.

Figura 61 - Comparação do percentual do módulo de Amortecimento.



Fonte: Próprio autor.

Figura 62 - Módulo de Cisalhamento e Módulo de Amortecimento pelo campo magnético.



Fonte: Próprio autor.

6 CONCLUSÃO

Em uma avaliação dos objetivos propostos, entre eles a construção de um eletroímã que permitisse a variação do campo magnético e facilidade de manuseio do experimental, atingimos o proposto, na parte da identificação e caracterização do MRE, entre eles o módulo da elasticidade do material e módulo de perda, conseguimos conhecimento suficiente para sua determinação e para futuras aplicações práticas, entre os resultados impressionantes, obtivemos para a amostra de 33%, entre a variação de 0,0T a 0,5T do mesmo MRE, 250% do módulo de Amortecimento, dentre os resultados, observamos características próximas da elástica ideal e da visco elástica, comportamentos vistos nos gráficos apresentados nos resultados, demonstrando o potencial do material em estudo.

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.