

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”

FACULDADE DE ENGENHARIA

CAMPUS DE ILHA SOLTEIRA

LEONARDO PUPIN MACHADO

ELASTÔMEROS MAGNETO-REOLÓGICOS:

**Influência da orientação das partículas na capacidade de amortecimento de
vibrações**

Ilha Solteira

2021

LEONARDO PUPIN MACHADO

ELASTÔMEROS MAGNETO-REOLÓGICOS:

Influência da orientação das partículas na capacidade de amortecimento de vibrações

Dissertação de Mestrado apresentado à Faculdade de Engenharia - UNESP – Campus de Ilha Solteira, como parte dos requisitos para obtenção do título Mestre em Engenharia mecânica.

Prof Dr. Amarildo Tabone Paschoalini
Orientador

Ilha Solteira

2021

FICHA CATALOGRÁFICA

Desenvolvido pelo Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação

E149e Machado, Leonardo Pupin.
Elastômeros magneto-reológicos: influência da orientação das partículas na capacidade de amortecimento de vibrações / Leonardo Pupin Machado. -- Ilha Solteira: [s.n.], 2021
75 f. : il.

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira. Área de conhecimento: Dinâmica de Sistemas Mecânicos, 2021

Orientador: Amarildo Tabone Paschoalini
Inclui bibliografia

1. Elastômero magneto-reológico. 2. Campo magnético. 3. Processo de cura.

Raiane da Silva Santos
Raiane da Silva Santos

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: Elastômeros Magneto-Reológicos: Influência da orientação das partículas na capacidade de amortecimento de vibrações

AUTOR: LEONARDO PUPIN MACHADO

ORIENTADOR: AMARILDO TABONE PASCHOALINI

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

A handwritten signature in blue ink, reading "Amarello Tabone Paschoalini", is positioned above the printed name of the supervisor.

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

Prof. Dr. FABIO ROBERTO CHAVARETTE (Participação Virtual)
Departamento de Engenharia, Física e Matemática / Instituto de Química do Campus de Araraquara - UNESP

Prof. Dr. ADRIANO SILVA BORGES (Participação Virtual)
Departamento de Engenharia Mecânica / Universidade Tecnológica Federal do Paraná - UTFPR

Ilha Solteira, 22 de fevereiro de 2021

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer primeiramente a minha família, por todo o apoio ao longo desses longos anos. Por sempre estarem ao meu lado e me apoiarem incondicionalmente.

Ao Prof. Dr. Amarildo Tabone Paschoalini por toda a paciência e atenção durante a execução do trabalho, assim como as sugestões que ajudaram nos momentos de gargalo.

A minha namorada, Bruna Stefani, que durante o mestrado sempre buscou me apoiar e incentivar, fazendo com que eu conseguisse seguir em frente.

Aos meus amigos, Claudio Ubeda Jr., Lucas Zanovelo, Mateus Faria, Peterson Pressato, Ruhan Ponce, Sofia Barros, amigos que sempre me apoiaram e espero poder retribuir algum dia todos os bons momentos juntos.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 88882.433518/2019-01.

“O problema não é o problema. O problema é a sua **atitude** sobre o problema.”

(Jerry Bruckheimer)

RESUMO

O objetivo deste trabalho foi estudar como a aplicação de um campo magnético durante a cura do Elastômero Magneto-Reológico afeta suas propriedades mecânicas e sua resposta ao campo magnético aplicado sobre o mesmo durante sua utilização. utilizou-se uma concentração de 33% em volume de ferro-carbonila, numa matriz de silicone, com aplicação de campo magnético e vácuo durante o processo de cura do material. O resultado foi um aumento, em geral acima de 20%, tanto nas propriedades do material na condição sem campo magnético quanto com a aplicação de campo, sendo a variação das propriedades, proporcional a intensidade do campo magnético aplicado. Essa variação causou uma alteração no módulo de perdas do material, tornando sua resposta mais viscosa ou elástica a depender da faixa de frequências analisada.

Palavras-Chave: Elastômero magneto-reológico. Campo magnético. Processo de cura.

ABSTRACT

The objective of this work was to study how the application of a magnetic field during the curing of the Magneto-Rheological Elastomer affects its mechanical properties and its response to the magnetic field applied on it during its use. A concentration of 33% by volume of ferro-carbonyl was used in a silicone matrix, with application of a magnetic field and vacuum during the curing process of the material. The result was an increase, generally above 20%, both in the properties of the material in the condition without magnetic field and with the application of the field, being the variation of properties, proportional to the intensity of the applied magnetic field. This variation caused a change in the loss module of the material, making its response more viscous or elastic depending on the frequency range studied analyzed.

Keywords: Magneto-rheological elastomer. Electromagnet. Curing process.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Acoplamento de absorvedor de vibrações em linha de transmissão.	14
Figura 2 – Acoplamento placa de aço e elastômero magneto-reológico.	15
Figura 3 – Deformação de uma borracha escolar posicionada entre duas placas paralelas sob influência de uma força de cisalhamento.	19
Figura 4 – Representação esquemática de um fluido magneto-reológico	21
Figura 5 – Esquema de um amortecedor linear magneto-reológico.	22
Figura 6 – Exemplos de MRE vulcanizado (a) sem campo magnético e (b) com campo magnético unidirecional.	24
Figura 7 – <i>Modelo de Kelvin-Voigt</i> : uma mola e um amortecedor em paralelo compõem um elemento do sistema.	25
Figura 8 – Para um comportamento idealmente elástico: funções temporais de τ , γ e $\dot{\gamma}$	26
Figura 9 – Para um comportamento idealmente viscoso: funções temporais de τ , γ e $\dot{\gamma}$	27
Figura 10 – Para um comportamento viscoelástico: funções temporais γ e τ , apresentando a mesma frequência, porém com fase δ entre elas.	27
Figura 11 – Decomposição de G^* nos eixos reais e imaginários.	28
Figura 12 – Decomposição de η^* nos eixos reais e imaginários.	29
Figura 13 – Em destaque, aplicação de MRE no aparato experimental antes de reinserção na câmara de vácuo e limpeza de resíduos	31
Figura 14 – Em destaque, (a) bobinas e (b) núcleo de ferro fundido que compõe o eletroímã utilizado para se gerar o campo magnético.	32
Figura 15 – MRE com aplicação de campo-magnético, em vermelho, detalhe da formação de “linhas”.	32
Figura 16 – Primeira iteração da montagem da bancada de ensaios.	34
Figura 17 – Segunda iteração da montagem da bancada de ensaios.	35
Figura 18 – Iteração final da montagem da bancada de ensaios.	35
Figura 19 – Exemplo de resultado preliminar imediatamente após ensaios com resultado aceitável.	39

Figura 20 – Exemplo de resultado preliminar imediatamente após ensaios com resultado insatisfatório.	40
Figura 21 – Loops de histerese num gráfico de tensão contra deformação de cisalhamento para uma frequência de $5Hz$ sob várias densidades de campo magnético sem aplicação de campo magnético durante a cura.	43
Figura 22 – Ângulo de fase para cada um dos campos aplicados com excitação de $5Hz$ sem aplicação de campo magnético durante a cura.	44
Figura 23 – Loops de histerese num gráfico de tensão contra deformação de cisalhamento para uma frequência de $5Hz$ sob várias densidades de campo magnético com aplicação de campo magnético durante a cura.. . . .	45
Figura 24 – Ângulo de fase para cada um dos campos aplicados com excitação de $5Hz$ com aplicação.	45
Figura 25 – Loops de histerese num gráfico de tensão contra deformação de cisalhamento para uma frequência de $20Hz$ sob várias densidades de campo magnético sem aplicação de campo magnético durante a cura.	47
Figura 26 – Ângulo de fase para cada um dos campos aplicados com excitação de $20Hz$ sem aplicação de campo magnético durante a cura.	48
Figura 27 – Loops de histerese num gráfico de tensão contra deformação de cisalhamento para uma frequência de $20Hz$ sob várias densidades de campo magnético com aplicação de campo magnético durante a cura.	49
Figura 28 – Ângulo de fase para cada um dos campos aplicados com excitação de $20Hz$ com aplicação de campo magnético durante a cura.	50
Figura 29 – Loops de histerese num gráfico de tensão contra deformação de cisalhamento para uma frequência de $40Hz$ sob várias densidades de campo magnético sem aplicação de campo magnético durante a cura.	51
Figura 30 – Ângulo de fase para cada um dos campos aplicados com excitação de $40Hz$ sem aplicação de campo magnético durante a cura.	52

Figura 31 – Loops de histerese num gráfico de tensão contra deformação de cisalhamento para uma frequência de $40Hz$ sob várias densidades de campo magnético com aplicação de campo magnético durante a cura.	53
Figura 32 – Ângulo de fase para cada um dos campos aplicados com excitação de $40Hz$ com aplicação de campo magnético durante a cura.	54
Figura 33 – Loops de histerese num gráfico de tensão contra deformação de cisalhamento para uma frequência de $90Hz$ sob várias densidades de campo magnético sem aplicação de campo magnético durante a cura.	55
Figura 34 – Ângulo de fase para cada um dos campos aplicados com excitação de $90Hz$ sem aplicação de campo magnético durante a cura.	56
Figura 35 – Loops de histerese num gráfico de tensão contra deformação de cisalhamento para uma frequência de $90Hz$ sob várias densidades de campo magnético com aplicação de campo magnético durante a cura.	57
Figura 36 – Ângulo de fase para cada um dos campos aplicados com excitação de $90Hz$ com aplicação de campo magnético durante a cura.	58
Figura 37 – Loops de histerese num gráfico de tensão contra deformação de cisalhamento para uma frequência de $170Hz$ sob várias densidades de campo magnético sem aplicação de campo magnético durante a cura.	59
Figura 38 – Ângulo de fase para cada um dos campos aplicados com excitação de $170Hz$ sem aplicação de campo magnético durante a cura.	60
Figura 39 – Loops de histerese num gráfico de tensão versus deformação de cisalhamento para uma frequência de $170Hz$ sob várias densidades de campo magnético com aplicação de campo magnético durante a cura.	61
Figura 40 – Ângulo de fase para cada um dos campos aplicados com excitação de $170Hz$ com aplicação de campo magnético durante a cura.	62

Figura 41 – Gráfico com os valores obtidos para K , para o sistema sem aplicação de campo magnético durante seu processo de cura, para cada uma das frequências ensaiadas.	63
Figura 42 – Gráfico com os valores obtidos para K , para o sistema com aplicação de campo magnético durante seu processo de cura, para cada uma das frequências ensaiadas.	64
Figura 43 – Gráfico com os valores obtidos para G^* , para o sistema sem aplicação de campo magnético durante seu processo de cura, para cada uma das frequências ensaiadas.	65
Figura 44 – Gráfico com os valores obtidos para G' , para o sistema sem aplicação de campo magnético durante seu processo de cura, para cada uma das frequências ensaiadas.	65
Figura 45 – Gráfico com os valores obtidos para G'' , para o sistema sem aplicação de campo magnético durante seu processo de cura, para cada uma das frequências ensaiadas.	66
Figura 46 – Gráfico com os valores obtidos para G^* , para o sistema com aplicação de campo magnético durante seu processo de cura, para cada uma das frequências ensaiadas.	67
Figura 47 – Gráfico com os valores obtidos para G' , para o sistema com aplicação de campo magnético durante seu processo de cura, para cada uma das frequências ensaiadas.	67
Figura 48 – Gráfico com os valores obtidos para G'' , para o sistema com aplicação de campo magnético durante seu processo de cura, para cada uma das frequências ensaiadas.	68
Figura 49 – Gráfico com os valores obtidos para η , para o sistema sem aplicação de campo magnético durante seu processo de cura, para cada uma das frequências ensaiadas.	69
Figura 50 – Gráfico com os valores obtidos para η , para o sistema com aplicação de campo magnético durante seu processo de cura, para cada uma das frequências ensaiadas.	69

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Lista de materiais inteligentes	23
---	----

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	– Tabela de concentrações por volume de Ferro Carbonila e seu respectivo ganho de rigidez.	30
Tabela 2	– Tabela de intervalo de ensaio para as faixas de frequências.	36

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	OBJETIVO	16
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	17
2.1	REOLOGIA	17
2.2	VISCOSIDADE	18
2.3	VIBRAÇÃO	19
2.3.1	Classificação de vibrações	19
2.4	AMORTECEDORES DE VIBRAÇÃO	20
2.5	FLUIDO MAGNETO-REOLÓGICO EM AMORTECEDORES	21
2.6	MATERIAIS INTELIGENTES	23
2.7	ELASTÔMERO MAGNETO-REOLÓGICO	23
2.7.1	Modelo de Kelvin-Voigt	25
2.7.2	Rigidez dinâmica e fase como propriedades do MRE	26
2.7.3	Módulo de Cisalhamento Complexo	28
2.7.4	Viscosidade Complexa	28
3	MATERIAIS E MÉTODOS	30
3.1	ESPECIFICAÇÕES DE MATERIAIS	30
3.2	CONFEÇÃO DO CORPO DE PROVA COM MRE	30
3.3	MONTAGEM EXPERIMENTAL	33
3.4	PARÂMETROS DO ENSAIO	34
3.5	METODOLOGIA DE ENSAIO	37
3.6	ROTINA COMPUTACIONAL DO ENSAIO	38
3.7	ANÁLISE DOS DADOS	41
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	42
4.1	TENSÃO DE CISALHAMENTO E ÂNGULO DE FASE	42
4.1.1	Resultados para frequência de excitação de 5Hz	43
4.1.2	Resultados para frequência de excitação de 20Hz	47

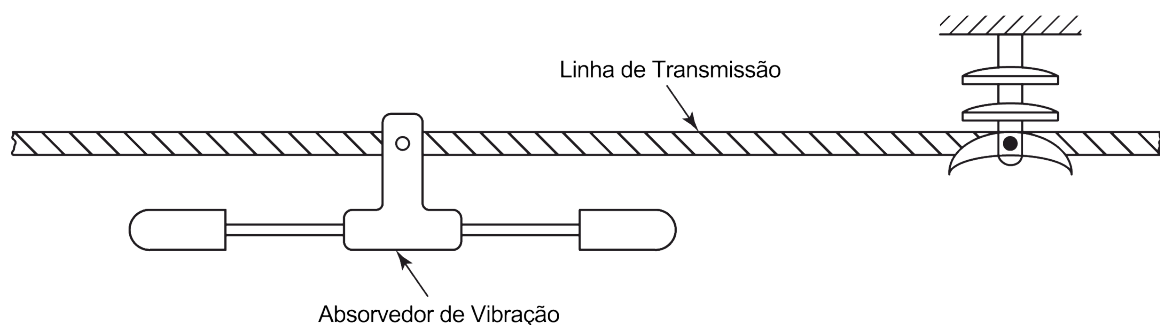
4.1.3	Resultados para frequência de excitação de 40Hz	51
4.1.4	Resultados para frequência de excitação de 90Hz	55
4.1.5	Resultados para frequência de excitação de 170Hz	59
4.1.6	Saturação da amostra sem aplicação de campo durante a cura .	62
4.2	RIGIDEZ	63
4.3	MÓDULO DE CISALHAMENTO	65
4.4	AMORTECIMENTO	69
5	CONCLUSÕES	71
5.1	TRABALHOS FUTUROS	71
	REFERÊNCIAS	72

1 INTRODUÇÃO

A vibração, proveniente de movimento relativo entre componentes, ou ainda da presença de rotação no sistema, causa danos consideráveis e de diversas formas, seja desgastando rolamentos e engrenagens, afrouxando ou soltando porcas e parafusos, ou ainda causando trepidação em processos de corte. Esses danos, no entanto, são mais graves quando existe o fenômeno de ressonância, que ocorre quando a frequência de excitação coincide com a chamada frequência natural do sistema, que causa um aumento exponencial nas amplitudes e forças envolvidas, com potencial de danos elevados.

Uma forma de mitigar os danos causados pela vibração, é dissipar a energia que causa essa vibração, uma ideia inicial foi a de fixar no sistema um ou mais sistemas secundários, ditos “absorvedores de vibração”, ao sistema vibrante (ESPÍNDOLA; BAVASTRI, 1997). Numa primeira tentativa, acoplou-se de um neutralizador, composto por um sistema massa-mola (*MK*), e que, portanto, não possuía dissipadores dedicados de energia (FRAHM, 1911), como mostrado na **Figura 1**.

Figura 1 – Acoplamento de absorvedor de vibrações em linha de transmissão.



Fonte – Rao (2018)

Existem duas principais dificuldades então para esta solução: a vibração no neutralizador será extremamente elevada, produzindo a possível ruptura do mesmo (via fadiga do material); grandes amplitudes de vibração ainda podem ser encontradas no sistema principal caso a frequência de excitação varie, devido a pequena faixa de frequências em que o absorvedor atua e a uma possível ressonância de uma das frequências naturais do sistema composto. (DEN HARTOG, 1985; FUKUSHIMA,

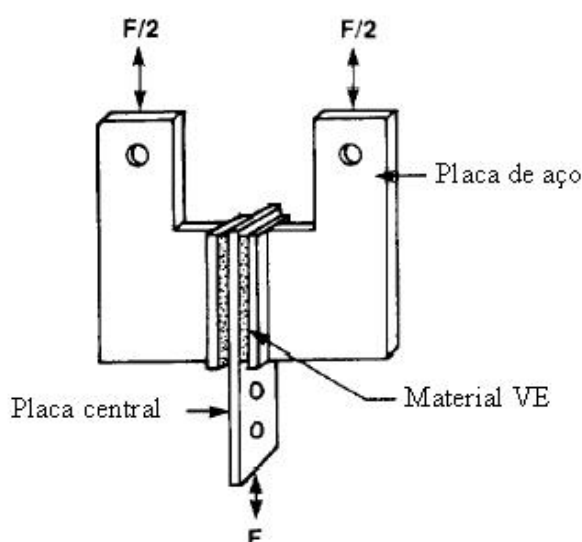
2016)

Uma forma de se corrigir os problemas anteriormente citados é aplicar então absorvedores com uma maior banda de atuação (DEN HARTOG, 1985). Isso é possível adicionando-se um elemento viscoso ao absorvedor, assim como fez Den Hartog e Ormondroyd (1928), o sistema, então, agora possuindo um modelo viscoso, passa a ser chamado de massa-mola-amortecedor (Neutralizador Dinâmico de vibração do tipo MCK). Materiais elastoméricos cumprem, de forma geral, de forma adequada esta função de dissipadores de energia (SNOWDON, 1968).

Existem estudos com materiais que possuem características entre a parte elástica e viscosa quando submetidos a deformação, ou seja, retornam as suas formas originais após o ciclo de deformação com parte da energia perdida em forma de calor. Tais materiais passaram, recentemente, a ser utilizados para fabricar amortecedores visco-elásticos, que visam reduzir as amplitudes de deslocamento e aceleração que ocorrem em estruturas devido às forças resultantes.

Uma das possíveis construções para esses dispositivos, é se utilizar de duas camadas, de espessura constante, desse material, confinadas entre três placas de outro material. A aplicação de um elemento viscoelástico, VE, em um absorvedor de vibração, com placas de aço, é mostrada na **Figura 2**.

Figura 2 – Acoplamento placa de aço e elastômero magneto-reológico.



Fonte – Varga, Filipcsei e Zrínyi (2006)

Uma classe de materiais leves ativos, os elastômeros magneto-reológicos (do inglês - *Magneto-Rheological Elastomers* - **MRE**) são aplicados devido as suas propriedades mecânicas controláveis. Elastômeros magneto-reológicos consistem em uma matriz elastomérica (borracha de silicone, natural ou poliuretano, por exemplo) dopada de particulado ferromagnético, geralmente micrométrico (WU *et al.*, 2010; ZAJĄC *et al.*, 2010).

Devido ao forte acoplamento magneto-mecânico, o MRE altera significativamente sua rigidez quando exposto a um campo magnético externo. Essa propriedade o torna aplicável em absorvedores de vibração variáveis, sendo eficientes para aplicação em dispositivos de precisão que necessitam de pouca ou nenhuma vibração agindo e mitigando as vibrações em tempo real (KIM *et al.*, 2012).

A fabricação de compostos elastoméricos tem como ônus o processo de vulcanização do material, que muitas vezes não propicia repetibilidade das propriedades entre dois lotes de mesma composição teórica. A aplicação de um processo de desaeração da mistura em uma câmara de vácuo mostrou-se eficaz em melhorar a repetibilidade das amostras (FUKUSHIMA, 2016).

Tendo-se então essa repetibilidade, possibilita-se analisar como outros parâmetros do processo afetam as propriedades do materiais, devido ao acoplamento anteriormente explicitado, escolheu-se verificar então como a presença de um campo magnético durante a cura afetaria as propriedades do material após pronto.

1.1 OBJETIVO

O objetivo do presente trabalho foi de analisar a influência da aplicação de um campo magnético durante a cura de uma Elastômero Magneto-Reológico sobre as propriedades do mesmo.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo é apresentada uma revisão da literatura de aspectos que são relevantes para o estudo de isolamento de vibrações em sistemas mecânicos utilizando-se de amortecedores ativos com a orientação de campo combinada.

2.1 REOLOGIA

A reologia é a ciência que estuda a deformação e fluxo. A etimologia do termo “reologia” indica que o mesmo é de origem grega, onde “rheo” significa “fluir”, o que faz com que reologia signifique literalmente “ciência dos fluxos”. Entretanto, a reologia não somente estuda **o fluxo de líquidos** mas também o comportamento de deformação de sólidos, tanto maciços e na região de fluência plástica (MEZGER, 2014).

O comportamento reológico, depende de diversos fatores, mas acima de tudo, as seguintes condições de ensaio são importantes:

- Tipo de carregamento (tipo de deformação, velocidade ou força);
- Grau de carregamento (baixo ou alto grau de cisalhamento);
- Duração do carregamento (tempo sob a carga e em repouso);
- Temperatura;

Também com importância reconhecida, os seguintes parâmetros também podem ser de importância:

- Concentração (de particulado sólido, moléculas de polímeros em solução);
- Pressão do ambiente;
- Valor do pH;
- Intensidade de campo magnético ou elétrico (para elastômeros magneto-reológicos ou eletro-reológicos); Cura por radiação UV.

Materiais elastoméricos possuem duas características hidrocoloides, sendo elas o gel e o fluxo. Tais propriedades fazem com que elastômeros apresentem características tanto elásticas, de materiais sólidos, quanto viscosas, de líquidos, sendo assim, integram uma nova classe, a dos materiais viscoelásticos. Tais materiais respondem a estímulos com comportamento reológico viscoelástico, ou seja, uma combinação entre respostas elástica e viscosa. Propriedades viscoelásticas têm grande influência sobre o desempenho de elementos de borracha (FUKUSHIMA, 2021).

Materiais que possuem valores constantes de viscosidade para uma determinada temperatura, são classificados como fluidos newtonianos, neste caso, a viscosidade se altera com a temperatura, porém, não com taxas de deformação, poucos fluidos se enquadram nesta classificação. No entanto, para um outro grande grupo, o dos fluidos não-newtonianos, a viscosidade varia de acordo com as taxas de deformação. As propriedades viscoelásticas dos elastômeros (polímero) são definidas em geral, de acordo com outros parâmetros, incluindo temperatura, pressão e tempo (FUKUSHIMA, 2021).

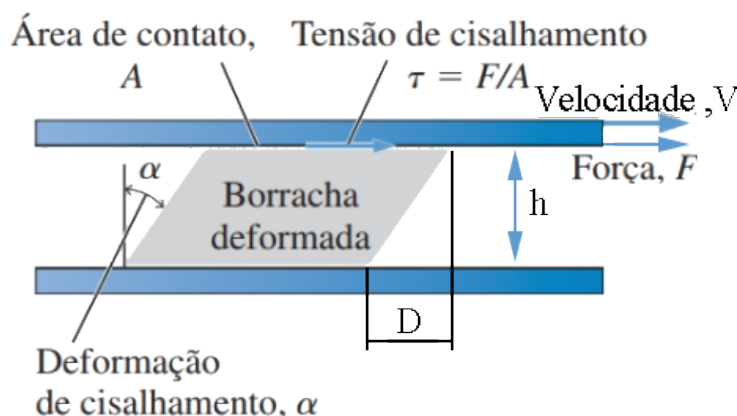
Como um material viscoelástico possui ambos modelos de resposta nenhum é capaz de representá-lo de forma satisfatória independentemente. Considere um material com essa resposta sendo submetido a duas mudanças não simultâneas no seu estado de tensões e deformações, sobrepostas uma sobre a outra. Após a primeira aplicação, porém antes da segunda, o material responde de forma dependente do tempo de maneira que depende da magnitude da primeira. Agora considerando um tempo arbitrário após uma segunda aplicação de estado de tensões. O material não somente irá responder ao segundo estímulo como também a resposta dependente do tempo do primeiro estímulo. Um material elástico, somente reagiria ao nível total de estresse de dado momento, por isso refere-se a essa característica de materiais viscoelásticos como “efeito de memória”. Isto é, o material depende não somente do estado atual de tensões como de todos os anteriores (CHRISTENSEN, 2012).

2.2 VISCOSIDADE

A viscosidade é uma propriedade física dos fluidos que caracteriza sua resistência ao escoamento. Consideremos duas placas paralelas com um bloco de borracha

entre eles, como mostrado na **Figura 3**.

Figura 3 – Deformação de uma borracha escolar posicionada entre duas placas paralelas sob influência de uma força de cisalhamento.



Fonte – Adaptado de Çengel e Cimbala (2015)

Aplicando-se uma força (F) na placa superior, enquanto se mantém a placa inferior fixa, causa a deformação mostrada na **Figura 3**. Sendo as áreas de contato, A , a separação entre as placas, h , e o deslocamento, D , a placa superior será movida em uma velocidade, V , de mesma direção e sentido da força. A tensão cisalhante, τ , é então dada por $\tau = \frac{F}{A}$, em Pa , tal força é, no entanto, devido à reação postulada na Lei de Newton, proporcional à taxa de deformação de cisalhamento, $(\frac{V}{h}, s^{-1})$. Essa constante de proporcionalidade é chamada então de viscosidade dinâmica ($\eta, Pa \cdot s$).

2.3 VIBRAÇÃO

Em sistemas mecânicos, o movimento oscilatório é geralmente referido como vibração (MEIROVITCH, 2001). A maioria das atividades humanas envolvem alguma forma de vibração, por exemplo, escutamos, pois o tímpano vibra, vemos, pois as ondas de luz sofrem vibração. Nossa respiração está intimamente relacionada com a vibração de nossos pulmões (RAO, 2018). A fala humana só se torna possível graças ao movimento oscilatório da laringe (e língua) (BISHOP, 1979).

2.3.1 Classificação de vibrações

Vibrações podem ser classificadas de diversas formas, se um sistema, depois de ação inicial, é deixado vibrar por conta própria, ou seja, não há presença de forças

externas no sistema, somente um deslocamento, velocidade ou impulso inicial, a vibração que segue é dita **vibração livre**; se há presença de uma força externa (muitas vezes repetitiva) no sistema, a vibração resultante é dita então **vibração forçada**.

Quanto ao amortecimento, se não há dissipação ou perda de energia de alguma forma, como atrito ou algum tipo de impedância, a vibração é dita **não-amortecida**; se a energia, no entanto, é perdida de algum modo, a vibração é dita **amortecida**.

É possível ainda dividir ainda as vibrações em **lineares** e **não-lineares**, a depender da atuação dos elementos do sistema, se todos se comportarem linearmente, o mesmo é dito **linear**, caso contrário, ele é dito **não-linear**.

Por fim, distinguem-se também entre **determinísticos**, no qual é possível se medir e prever o valor da vibração em qualquer tempo, ou **aleatórios**, nos quais isso já não é mais possível.

No presente trabalho a vibração adotada para os ensaios é dita **forçada, amortecida, não linear** (devido à presença de material visco-elástico no amortecedor — MRE) e **determinística**.

2.4 AMORTECEDORES DE VIBRAÇÃO

Todos os sistemas mecânicos apresentam algum grau de amortecimento, em geral, algo positivo. Caso o sistema possua fonte externa de vibração, a amplitude da mesma tende a crescer quando a excitação estiver perto de uma das frequências naturais, se não houver amortecimento. A presença de amortecimento sempre limitará a amplitude da vibração.

Na hipótese dessa frequência de excitação ser conhecida, é possível evitar a ressonância mudando-se a frequência natural, que esta sendo afetada, do sistema. Entretanto, é possível que o sistema necessite operar num intervalo de velocidades, como no caso de variação de velocidade de um motor elétrico ou à combustão. Neste caso, já não é mais possível evitar a ressonância em toda faixa operacional do sistema, pode-se evadir este problema adicionando-se de materiais com alta capacidade de amortecimento (KARNOPP, 1995), como elastômeros.

Anexar corpos secundários em um sistema vibratório é uma prática secular,

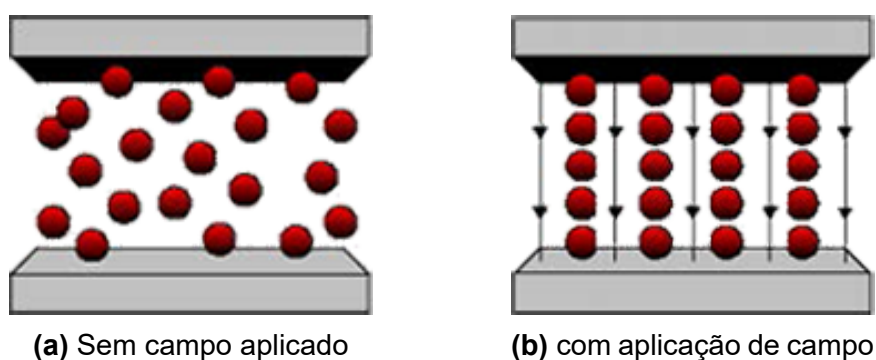
primordialmente sugerida por Frahm (1911) por meio de uma patente. Posteriormente, o modelo mais simples, estudado por Den Hartog e Ormondroyd (1928), e discutidos por diversos autores, como Snowdon (1968), Harris e Crede (1976), Hunt (1979), e mais recentemente, por Espíndola e Bavastri (1997). Os dispositivos anexados por tal método são chamados de absorvedores dinâmicos de vibração.

Absorvedores dinâmicos de vibração, ou, mais simplificada, absorvedores de vibração, consistem em outro corpo ou massa acoplada ao original, que precisa ser protegido das vibrações. O processo de se acoplar um corpo secundário, tem como objetivo adicionar mais um grau de liberdade ao sistema original, este agora tendo dois graus de liberdade, e portanto, duas frequências naturais. Boa parte do maquinário em que esta técnica é aplicada, possui velocidade de rotação constante, então, ajusta-se o absorvedor para a frequência desejada, uma vez que a mesma possui uma banda de efetividade muito estreita (RAO, 2018).

2.5 FLUIDO MAGNETO-REOLÓGICO EM AMORTECEDORES

De modo a se solucionar esse estreitamento da banda de frequências, buscaram-se alternativas. Os primeiros amortecedores explorados por Rabinow (1948) continham fluidos magneto-reológicos. Tais fluidos possuem particulado ferromagnético que apresentam um momento dipolo paralelo à direção das linhas de fluxo do campo magnético. Exemplificados na **Figura 4**.

Figura 4 – Representação esquemática de um fluido magneto-reológico



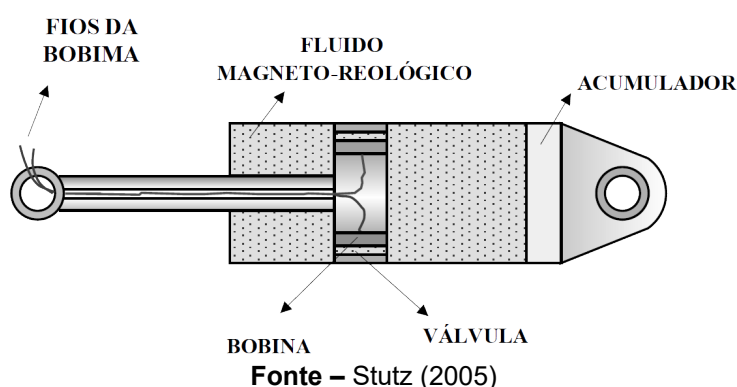
Fonte – Stutz (2005)

Uma das principais características desse fluido é a proporcionalidade entre as mudanças das propriedades com a magnitude do campo magnético aplicado, que

ocorre em questão de milissegundos. À medida que se aumenta o campo magnético externo, a energia mecânica necessária para romper a resistência da partícula na cadeia, como apresentada na **Figura 4b**, aumenta (STUTZ, 2005).

A aplicação mais comum de fluidos magneto-reológicos se dá em amortecedores magneto-reológicos. A alteração reversível de sua viscosidade garante a tais fluidos uma grande potencialidade de aplicações, tanto em controle, quanto em isolamento de vibrações (STUTZ, 2005).

Figura 5 – Esquema de um amortecedor linear magneto-reológico.



Num amortecedor de fluido MR, a força é gerada de maneira passiva, sendo capaz de dissipar apenas energia do sistema ao qual ele está associado. Apesar da força ser gerada de maneira passiva, a sua intensidade pode ser controlada por meio ativo, através da exposição a um campo magnético controlado. Por tal motivo, esses amortecedores são classificados como semi-ativos (STUTZ, 2005).

Fluidos MR possuem, no entanto, alguns inconvenientes, como a sedimentação de partículas, ainda que Carlson e Jolly (2000) tenha encontrado uma solução ao se utilizar de uma matriz porosa absorvente, e a necessidade de vedação desses dispositivos.

A resposta definitiva para a sedimentação de partículas foi a aplicação de uma elastômero como matriz. O particulado sendo homogeneizado com o elastômero ainda líquido, sendo que, após a cura, permanecerão fixos dentro de uma rede de ligações cruzadas do elastômero.

2.6 MATERIAIS INTELIGENTES

Materiais que apresentam respostas reversíveis a diferentes estímulos recebem o nome de “inteligentes” ou “ativos”. Tal característica é muito útil em diversas aplicações, incluindo-se, mas não se limitando a área de controle. Alguns exemplos de materiais comuns, mas que possuem tal rótulo, de “materiais inteligentes”, são os piezo-elétricos, eletro-resistivos, magneto-resistivos, eletro-resistivos, magneto-reológicos, termossensíveis e ligas com memória de forma.

A entrada a e saída de materiais inteligentes pode pertencer a áreas completamente diferentes, abrangendo a quase todas as áreas de engenharia (FUKUSHIMA, 2016). Um quadro com alguns materiais inteligentes, suas entradas, saídas e aplicações, é apresentado no **Quadro 1**.

Quadro 1 – Lista de materiais inteligentes

Material	Entrada	Saída	Aplicação
Gél Polimérico	Alteração de pH	Contração	Músculos Artificiais
Fluido eletro-reológico	Sinal Elétrico	Alteração da Viscosidade	Amortecedores, sistema de torção
Piroelétrico	Temperatura	Sinal Elétrico	Sensor de calor
Elastômeros Dielétricos	Voltagem	Deslocamento	Robótica

Fonte – Callister (2010) - Adaptado

2.7 ELASTÔMERO MAGNETO-REOLÓGICO

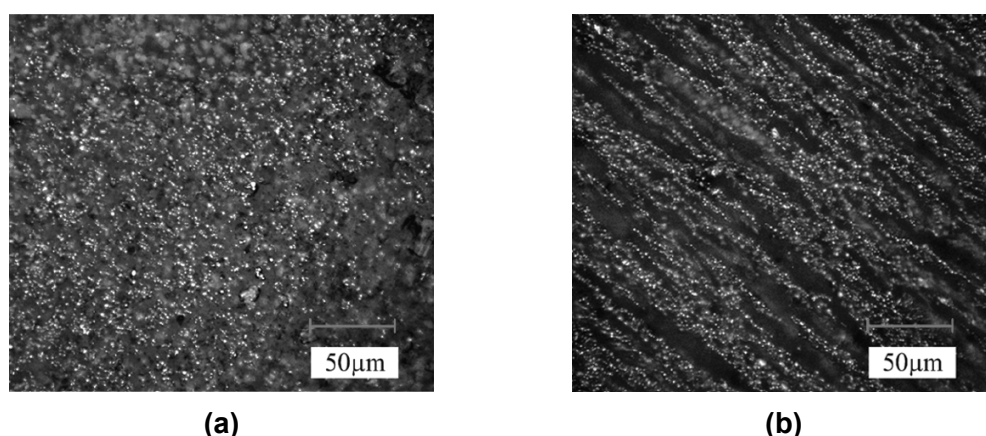
Os elastômeros magneto-reológicos são, de forma simples, uma matriz polimérica dopada com particulado ferromagnético (ZAJAC *et al.*, 2010). Em virtude do seu forte acoplamento magneto-mecânico, possuem a propriedade de alterar significativamente sua rigidez quando expostos a um campo magnético externo.

Os elastômeros magneto-reológicos geralmente são compostos de uma matriz sólida, eletricamente isolante, como borracha, silicone, borracha natural poliuretano ou termoplásticos. Para a composição da matriz há uma grande variedade de materiais encontrados no mercado e na literatura. Eles são também chamados elastômeros magneto-ativos. Respeitando a nomenclatura usual, continuaremos a tratar nesse trabalho como a denominação Elastômeros Magneto-Reológicos (MRE).

A matriz de borracha de silicone é muito utilizada, na literatura consultada, principalmente devido a sua excelente processabilidade, ao seu bom comportamento entre as propriedades mecânicas, térmicas e envelhecimento, bem como ao seu uso generalizado em aplicações industriais. Uma matriz menos rígida, com baixo módulo de elasticidade, tende, também, a aliviar a interação magneto-mecânica.

Caso um campo seja aplicado no composto ao compósito elastomérico durante a cura do material, propriedades anisotrópicas podem ser conferidas ao mesmo, dá-se o nome de MRE “campo-estruturado” nestes casos. As partículas formam cadeias que se aglutinam, vagarosamente, em colunas. Um exemplo desse efeito da aplicação de campo magnético pode ser visualizado na **Figura 6** (LIAO *et al.*, 2012).

Figura 6 – Exemplos de MRE vulcanizado (a) sem campo magnético e (b) com campo magnético unidirecional.



Fonte – Liao *et al.* (2012) - Modificado

Essa aglutinação tem como efeito aumentar a proximidade entre as partículas de ferro-carbonila, que afetam diretamente a força-normal, por magnetização, da amostra de MRE. Para uma mesma fração de particulados, a distância entre partículas de uma MRE isotrópico, **Figura 6a**, é muito maior que a equivalente de um modelo anisotrópico, **Figura 6b**. Essa diferença em força normal, obtida por magnetização, se traduz ainda como aumento nas propriedades de cisalhamento do material (LIAO *et al.*, 2012), assim como desejado postulado por vários outros pesquisadores (DAVIS, 1999; LI; ZHOU; TIAN, 2010; ZHANG; GONG; CHEN, 2010).

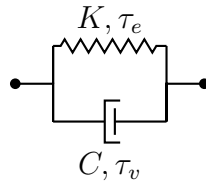
Como sugerido por Machado (2019), e posteriormente investigado também por Carvalho (2020), dando sequência a parte do trabalho de Proença (2019), optou-se

por modelar o material de acordo com o modelo de “Kelvin-Voigt”.

2.7.1 Modelo de Kelvin-Voigt

O Modelo de Kelvin-Voigt, consiste em modelar cada elemento como sendo um agrupamento em paralelo de um elemento puramente viscoso e um elemento puramente elástico. Tal configuração traz como consequência a possibilidade de tratar separadamente cada componente elástica ou viscosa, sendo assim o cisalhamento total é distribuído em duas componentes, a componente elástica, τ_e , e a componente viscosa, τ_v , ou seja, $\tau = \tau_e + \tau_v$. Tal arranjo é exibido na **Figura 7**.

Figura 7 – Modelo de Kelvin-Voigt: uma mola e um amortecedor em paralelo compõem um elemento do sistema.



Fonte – Machado (2019) - modificado

Considerando-se que a deformação acontece de forma simultânea em ambos os elementos, e estendendo-se isto para as taxas de cisalhamentos, temos: $\gamma = \gamma_e + \gamma_v$ e $\dot{\gamma} = \dot{\gamma}_e + \dot{\gamma}_v$.

Aplicando-se a lei de Newton para o elemento viscoso:

$$\tau_v = \eta \cdot \dot{\gamma}_v \quad (1)$$

Aplicando a lei de Hooke para o elemento elástico:

$$\tau_e = G \cdot \gamma_e \quad (2)$$

Somando-se ambos resultados, obtemos a tensão cisalhante resultante de acordo com o modelo de Kelvin-Voigt.

$$\tau = \eta \cdot \dot{\gamma}_v + G \cdot \gamma_e \quad (3)$$

A **Equação 3** nos permitirá futuramente estimar os valores de amortecimento obtidos durante o ensaio, uma vez que teremos tanto a força cisalhante total quanto as deformações e suas taxas, além de se conhecer as propriedades elásticas do material.

2.7.2 Rigidez dinâmica e fase como propriedades do MRE

Para que possamos realizar tal classificação, é importante considerar as seguintes condições:

1. As amostras aderem a ambas as partes sem deslizar ao longo delas;
2. A deformação aplicada sobre as amostras é homogênea durante todo o cisalhamento. Portanto, sendo a tensão de cisalhamento $\sigma [Pa] = \frac{F}{A}$ e a deformação $\gamma = \tan \varphi$.

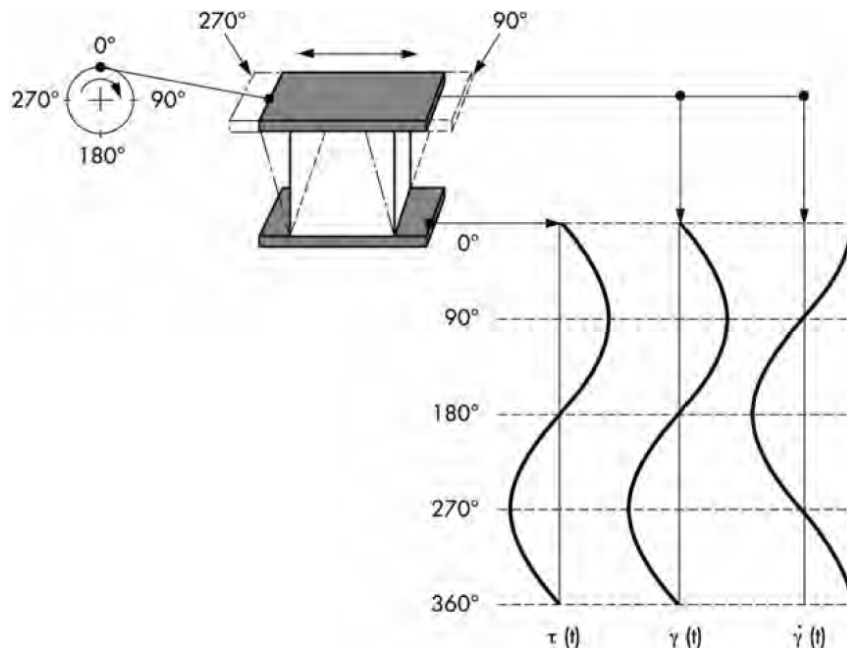
Para materiais idealmente elásticos, a “Lei de Hooke” é aplicada como se segue:

$$\tau(t) = G^* \cdot \gamma(t) \quad (4)$$

Com G^* sendo o **módulo de cisalhamento complexo**.

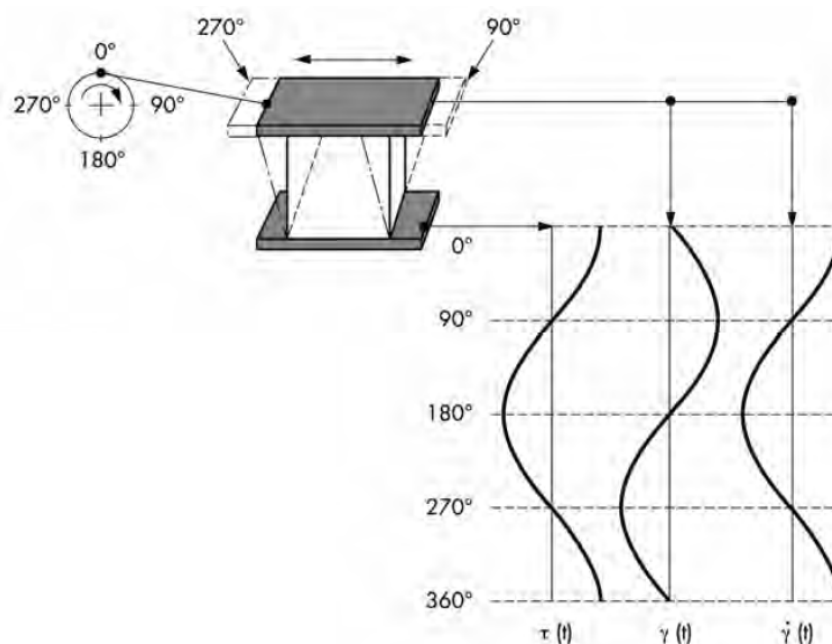
Para um teste harmônico idealmente elástico, a resposta, τ , do sistema a uma entrada, γ , uma representação da fase, ou defasagem, entre os sinais é exemplificada na **Figura 8**, já a **Figura 9** retrata uma resposta de um sistema idealmente viscoso.

Figura 8 – Para um comportamento idealmente elástico: funções temporais de τ , γ e $\dot{\gamma}$.



Fonte – Mezger (2014).

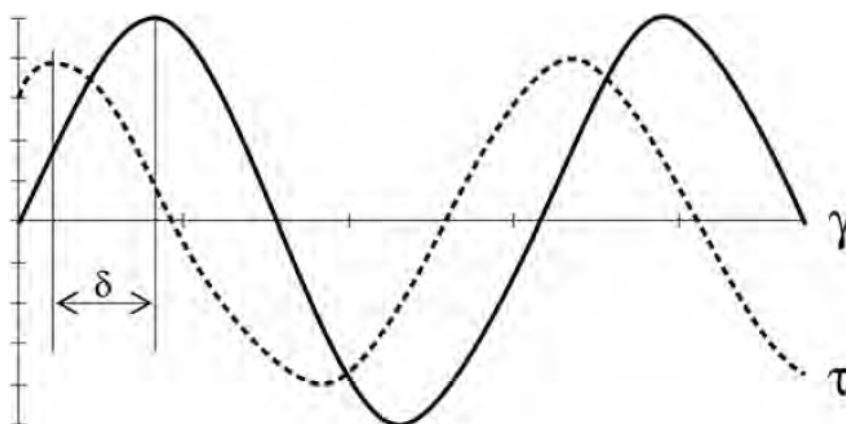
Figura 9 – Para um comportamento idealmente viscoso: funções temporais de τ , γ e $\dot{\gamma}$.



Fonte – Mezger (2014).

Um material como o MRE, não se encaixa em nenhuma dessas duas opções, sendo chamado de viscoelástico. A fase entre a entrada e a resposta então é chamada de ângulo de fase, δ , ou ainda ângulo de perda, sempre entre 0 e 90°, ou $(\frac{\pi}{2})$ em radianos, representado na **Figura 10**. Sendo assim, representando a curva de γ , como uma função seno defasada, temos:

Figura 10 – Para um comportamento viscoelástico: funções temporais γ e τ , apresentando a mesma frequência, porém com fase δ entre elas.



Fonte – Mezger (2014).

$$\gamma(t) = \gamma_A \cdot \text{sen}(\omega t + \delta) \quad (5)$$

2.7.3 Módulo de Cisalhamento Complexo

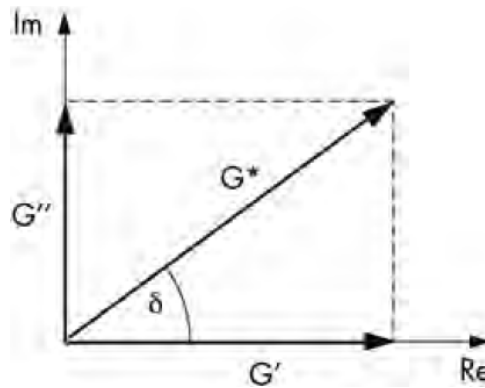
O módulo de cisalhamento complexo é obtido aplicando-se a “Lei de Hooke” da seguinte forma:

$$G^* = \frac{\tau(t)}{\gamma(t)} \quad (6)$$

Sendo τ a tensão em $[Pa]$ e γ a deformação, usualmente em $\frac{m}{m}$ ou ainda, em alguns casos, %.

O módulo de cisalhamento complexo, G^* , pode ser decomposto em duas componentes perpendiculares, a primeira sendo a componente real, chamado de módulo de armazenamento G' , e a segunda, a componente imaginária de G^* , dito módulo de perdas G'' , um diagrama mostrando esse arranjo é mostrado na **Figura 11**.

Figura 11 – Decomposição de G^* nos eixos reais e imaginários.



Fonte – Mezger (2014).

Das componentes de G^* , obtém-se o fator de perdas, $\tan \delta = \frac{G''}{G'}$. Caso $G'' > G'$, o comportamento do material é como a de um sólido, caso $G'' < G'$, o comportamento remete ao de um gel, sendo de interesse para processos de formação, cura e endurecimento o ponto no qual $G'' = G'$.

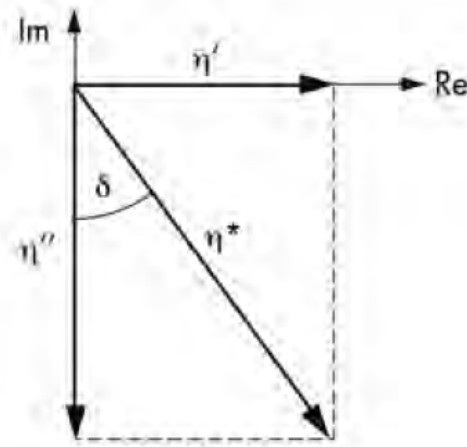
2.7.4 Viscosidade Complexa

Aplicando-se a “Lei de Newton”, na forma:

$$\eta^* = \frac{\tau(t)}{\dot{\gamma}(t)} \quad (7)$$

Sendo η^* , medida em $[Pa.s]$, é marcada com um asterisco, lido muitas vezes como estrela, para diferenciação em relação as viscosidades cisalhantes η , que, por exemplo não possuem sinais se determinadas em situações de cisalhamento constante.

Figura 12 – Decomposição de η^* nos eixos reais e imaginários.



Fonte – Mezger (2014).

É possível se relacionar η^* com G^* e δ , sendo a forma apresentada para tal:

$$|G^*| = \omega \cdot |\eta^*| \quad (8)$$

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo serão apresentados os materiais e métodos utilizados no desenvolvimento e análise do MRE estruturado. Para a confecção da matriz polimérica, utilizou-se a borracha de silicone, sendo previamente à sua vulcanização, adicionadas partículas ferromagnéticas de ferro carbonila na confecção do MRE.

3.1 ESPECIFICAÇÕES DE MATERIAIS

A borracha de silicone tem a especificação que segue: “BS Adesivo Branco OS”, adquirida da empresa “Redelease”, apresentando um elastômero bi-componente, vulcanizável à temperatura ambiente, que após a quantidade de catalisador, resulta num produto elástico e resistente.

A partícula ferromagnética escolhida foi a de “ferro carbonila” (*Iron Carbonyl*), com especificação “C3518”, foi adquirida da empresa “Sigma-Aldrich”, apresentando-se como um pó cinza, que contém no mínimo, 97% de ferro.

3.2 CONFECÇÃO DO CORPO DE PROVA COM MRE

Segundo a dissertação de mestrado de Fukushima (2016), para os mesmos materiais utilizados, obteve-se a **Tabela 1** para o MRE isotrópico. Como a aplicação de um campo magnético durante a cura gera um ganho ainda maior de rigidez (LIAO *et al.*, 2012), escolheu-se a composição com 33% de ferro, que já apresentava mais ganho, de modo a se ter uma magnificação dos efeitos.

Tabela 1 – Tabela de concentrações por volume de Ferro Carbonila e seu respectivo ganho de rigidez.

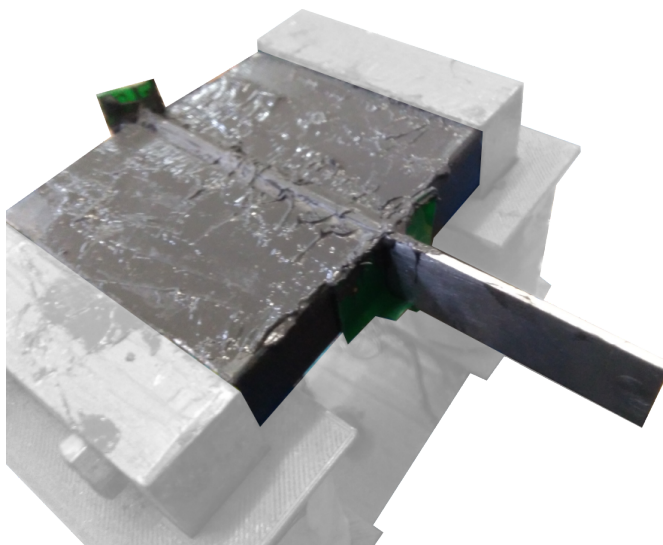
Nome da Amostra	Fração Si (% v/v)	Fração Fe (% v/v)	Ganho de Rigidez (%)
SiFe18	82	18	34, 20 ± 5, 34
SiFe33	67	33	54, 70 ± 11, 77
SiFe48	52	48	41, 96 ± 7, 74

Fonte – Fukushima (2016).

Para a confecção da amostra de MRE com 33% de ferro por volume de borracha de silicone, adicionou-se a 8g de borracha de silicone, componente A (ou componente base), 25,7g de ferro carbonila. Após essa adição, o resultado foi misturado manualmente até sua homogeneidade, ou cerca de cinco minutos, após isso adicionou-se 0,24g do componente B da borracha, o catalisador, cerca de três gotas.

Essa proporção, com menos catalisador do que o recomendado para uma cura rápida, conseguiu-se retardar o início do processo de cura, esse atraso permitiu que a mistura fosse adicionada a uma câmara de vácuo para desaeração da mistura. Após a desaeração, foram utilizadas chapas finas para colocar o MRE nos espaços entre as peças de aço, que eram partes do eletroímã utilizado, e a chapa de alumínio, que age como a entrada do sistema. O resultado desse processo é então mostrado na **Figura 13**.

Figura 13 – Em destaque, aplicação de MRE no aparato experimental antes de reinserção na câmara de vácuo e limpeza de resíduos



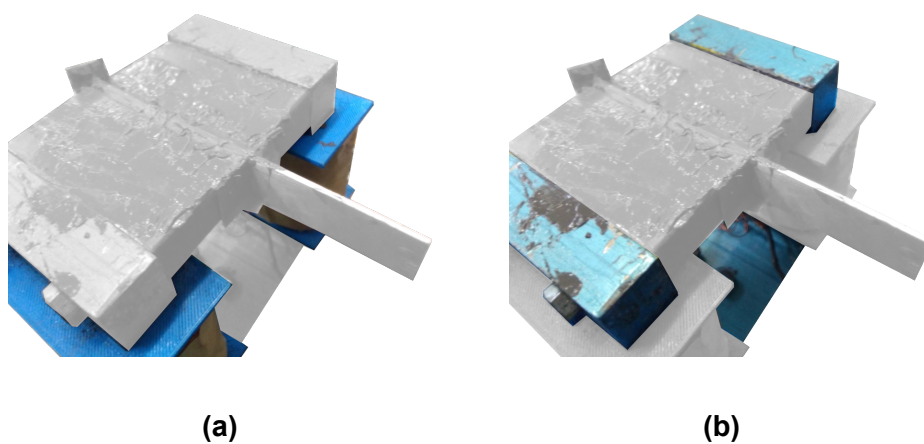
Fonte – Próprio Autor.

Após construir-se o aparato da **Figura 13**, o mesmo foi reinserido na câmara de vácuo onde foi deixado por três minutos a uma pressão absoluta de 0,1bar, executando-se assim, uma segunda desaeração, para evitar formação de discontinuidades internas, “bolhas”, no MRE.

Após retirada da câmara, colocou-se uma pouco mais de MRE, para compensar a remoção de bolhas, e eventual redução de volume do mesmo. O próximo passo

então foi ligar o eletroímã presente, **Figura 14**, para realizar o alinhamento do MRE. O campo foi gerado utilizando-se de uma fonte DC, modelo “MPC-303DI” da Minipa, com duas saídas de $30V \times 3A$, ligadas em série totalizando $60V \times 3A$, cujo ajuste foi feito de modo a se manter se um campo, gerado pelo eletroímã, fixo de $0,5870T$, ou $5870G$, de intensidade durante 15 minutos, mantendo-se o eletroímã resfriado por uma ventoinha de $140mm$, na potência máxima, em temperatura ambiente de 22° .

Figura 14 – Em destaque, (a) bobinas e (b) núcleo de ferro fundido que compõe o eletroímã utilizado para se gerar o campo magnético.



Fonte – Próprio Autor.

Durante esse período de tempo, notou-se então a formação de pequenas linhas no MRE, como mostra a **Figura 15**. A, mesmo que pequena, inclinação dessas linhas, já indicava um começo de cura dessa camada externa do MRE.

Figura 15 – MRE com aplicação de campo-magnético, em vermelho, detalhe da formação de “linhas”.



Fonte – Próprio Autor.

Foi também confeccionado um segundo corpo de prova, com mesmas especificações e procedimento, diferindo-se somente quanto a não aplicação do campo

magnético durante sua cura neste caso. Ele será utilizado para controle estatístico.

3.3 MONTAGEM EXPERIMENTAL

Após a confecção da amostra de MRE, foi necessário então aguardar o tempo indicado de cura do material para a quantidade de catalisador utilizada, que gira em torno de 72h. Após este tempo então iniciou-se o processo de montagem da bancada experimental.

A peça que contem MRE foi então fixada utilizando-se de dois parafusos sextavados M6 em cada lado do mesmo, a fim de completar o núcleo do eletroímã e se garantir a rigidez da conexão do corpo de prova com o eletroímã.

Inicialmente fixou-se na bancada, com isolamento externo de vibrações, o shaker, após isso foi construída uma base com madeira, rígida, para o eletroímã que suporta o MRE ensaiado. Na parte média, foi feita uma pequena incisão no MRE para que o gaussímetro pudesse ser corretamente instalado, para se ajustar e monitorar o campo durante o ensaio.

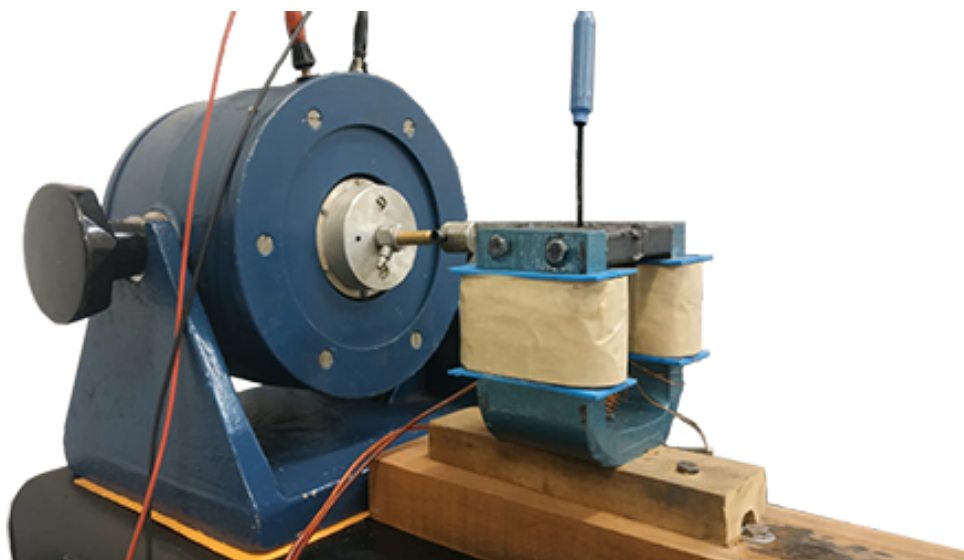
Os fios das bobinas do eletroímã então foram ligados a fonte DC citada por meio de conectores tipo macho-jacaré. A fonte teve suas saídas ligadas em série de forma a somar a corrente gerada por cada uma, para que fosse possível alcançar o limite superior da intensidade do campo magnético desejada, $0,5000T$.

Devido à altura da entrada do sistema, foi necessário adicionar um segundo elemento de madeira, para que não existissem problemas quanto ao alinhamento do sistema para com o shaker.

Após a montagem da bancada exibida na **Figura 16**, foram iniciados os testes preliminares. Entretanto, os ensaios preliminares não geraram bons resultados, mesmo quando os dados eram filtrados, independentemente do uso de filtros físicos ou numéricos.

Após análise dos resultados dessa montagem, foi identificado o problema, a base de madeira, mais especificamente ao segundo elemento adicionado. Mesmo sendo um madeira relativamente rígida quando comparada à outras, devido a forma de montagem, a fixação por parafusos, e ao fato de que o mesmo possuía ainda uma

Figura 16 – Primeira iteração da montagem da bancada de ensaios.



Fonte – Próprio Autor.

aparente elasticidade, o aparato acabava por vibrar de forma análoga a um pendulo invertido, com amplitudes suficientemente grandes para causar problemas quando a aquisição da entrada e da saída.

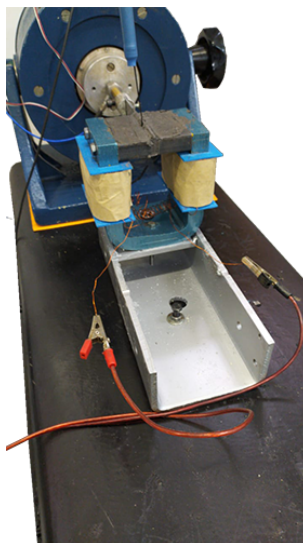
A solução encontrada então foi-se então refazer este suporte para o eletroímã. Utilizando-se de um viga em “U”, com um apoio para o eletroímã sendo soldado na altura adequada para o correto alinhamento. O resultado dessa segunda iteração pode ser visto na **Figura 17**.

O arranjo mostrado na **Figura 17**, melhorou em muito os resultados, no entanto, ainda existiam algumas frequências mais baixas, que propiciavam o mesmo problema que na primeira solução, por fim, anexou-se então mais duas barras para suporte, sendo a bancada final de testes, exibida na **Figura 18**.

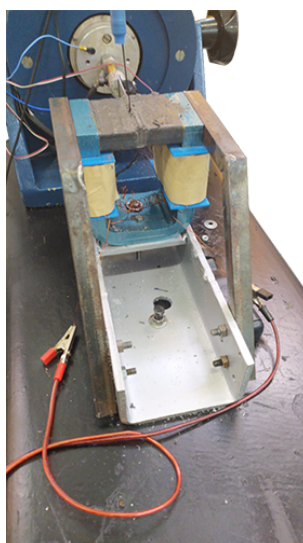
3.4 PARÂMETROS DO ENSAIO

Com a fabricação do corpo de prova, e conhecendo as limitações do sistema, partiu-se então para a definição dos parâmetros de ensaio.

Por se tratar de um estudo de vibrações, um dos mais importantes dados é o comportamento de cada material em certa faixa de frequências. Devido a limitações instrumentais do laboratório, por se tratar de um sistema uniaxial, e pelo método de

Figura 17 – Segunda iteração da montagem da bancada de ensaios.

Fonte – Próprio Autor.

Figura 18 – Iteração final da montagem da bancada de ensaios.

Fonte – Próprio Autor.

fixação do shaker, cuja massa possui inércia de grandeza suficiente para gerar discrepâncias entre os dados obtidos pelo ensaio de impacto e os com vibração forçada pelo o shaker, optou-se por ao invés de se utilizar um método de martelo de impacto, varrer-se a frequência num dado intervalo.

Ainda para escolher os parâmetros de ensaios, foram realizados diversos ensaios a fim de se definir o escopo do ensaio. Como o amplificador foi construído e

calibrado, percebe-se que para uma frequência iguais ou superiores a 180Hz , torna-se inviável utilizar-se uma força RMS maior do que $3,5\text{N}$.

Neste caso, as frequências acima de 180Hz apresentariam a necessidade de um imenso ganho para o sinal, devido ao aumento da aceleração ser proporcional ao aumento da frequência. Sendo o aumento muito rápido para frequências mais elevadas.

Definiu-se então, por meio de varreduras entre intervalos sugeridos na literatura, que a faixa de ensaios iria desde 3Hz até 180Hz . Devido a quantidade desnecessária de testes que seriam feitos para frequências mais elevadas, ficou definido como na **Tabela 2** as frequências a serem ensaiadas.

Tabela 2 – Tabela de intervalo de ensaio para as faixas de frequências.

Faixa de Frequências (Hz)	Passo dos Ensaios (Hz)
3 – 35	1
35 – 100	5
100 – 180	10

Fonte – Próprio Autor.

Dada a fonte utilizada na montagem da bancada, que foi a mesma utilizada para aplicação do campo durante a cura, o campo gerado possuía limite superior de $0,5870T$. Entretanto, tal valor ocasionava um aquecimento elevado tanto na fonte quanto no eletroímã.

Levando este fato em consideração, adotou-se por segurança utilizar-se no máximo $0,5000T$, que ainda gerava aquecimento que podia ser mitigado suficientemente com o mesmo ventilador utilizado no processo de cura e controle da temperatura ambiente com o ar condicionado. Tendo-se o limite superior, adotou-se então uma variação de $0,1000T$ para cada etapa do ensaio.

Considerando-se as frequências escolhidas, para cada magnitude de campo, temos 54 frequências para análise.

3.5 METODOLOGIA DE ENSAIO

Para execução dos ensaios, foi utilizado de um computador com o software “MATLab®” instalado para execução do código, posteriormente comentado.

Primeiramente ajustar-se o gaussímetro e garantir seu posicionamento perpendicular e no centro da profundidade do MRE. Após isso, conectou-se o filtro, já com alimentação inserida, no computador, na entrada de áudio.

A saída do filtro foi conectada na entrada do amplificador analógico, cuja saída então enviava o sinal para o “shaker”. Foi então colocada uma célula de carga entre o sistema e o “shaker”, sendo esta a entrada do sistema. Na conexão com a chapa de alumínio, foi fixado um acelerômetro, sendo esta a saída do sistema, que por sua vez, foi conectada de volta ao computador.

Após verificadas todas as conexões, iniciavam-se os ensaios. Tais ensaios eram feitos ao menos três vezes por combinação de frequência, a primeira para ajuste, manual, do amplificador analógico para manter a força capitada na célula de carga o mais próximo possível do valor nominal decidido, de $3,5N$.

Entre as variações de frequência de excitação, sempre se dava um intervalo suficiente para que o sistema não apresentasse mais nenhuma resposta proveniente do ensaio anterior, verificando-se por um software de visualização de osciloscópio digital no mesmo computador.

Após varrer todas as frequências para determinado campo, caso existisse um campo magnético remanescente medido pelo gaussímetro, invertiam-se as saídas da fonte DC e aplicavam-se pequenos pulsos de corrente, para realizar a desmagnetização do eletroímã.

Após a desmagnetização, elevava-se, simultânea e igualmente nas duas saídas da fonte, a corrente que serve de ajuste para a magnitude do campo magnético uniforme gerado pelo eletroímã. Com isso, ajustavam-se seus valores de acordo com a medida obtida do gaussímetro, tendo precisão de $\pm 30G$, ou $\pm 0,0030T$, para esse ajuste.

3.6 ROTINA COMPUTACIONAL DO ENSAIO

Com o auxílio de um computador, e do software “MATLab”, criou-se uma rotina na qual se gerava uma entrada do tipo seno, com as características, frequência e amplitude, desejadas. A saída, neste algoritmo, era gravada com uma frequência amostral ser de 8192Hz com 24 bits e com dois canais uma para o acelerômetro, entrada, e outro para a força, saída.

Com o sinal confeccionado o mesmo era enviado a um filtro passa baixo. Após isso o sinal tinha um ganho adicionado por um amplificador analógico, com calibração conhecida, e só então o sinal servia como entrada para um “shaker”, da “VEB ROBOTRON - MESSELEKTRONIK”, que a partir de uma entrada do tipo voltagem gera um deslocamento na sua saída.

A sensibilidade da célula de carga era de $11,241\text{ mV}/\text{N}$, e a sensibilidade do acelerômetro, para faixa de ensaio, era de $100\text{ mV}/\text{G}$.

Após a aquisição dos dados, partia-se então para o tratamento do sinal em tempo real para verificar possíveis discontinuidades. Para tal, utiliza-se de um filtro passa-banda, do tipo “Butterworth”, de segunda ordem que tem faixa de 88 a 112% da frequência do sinal inicialmente gerado. De forma a reduzir os ruídos presentes no sistema.

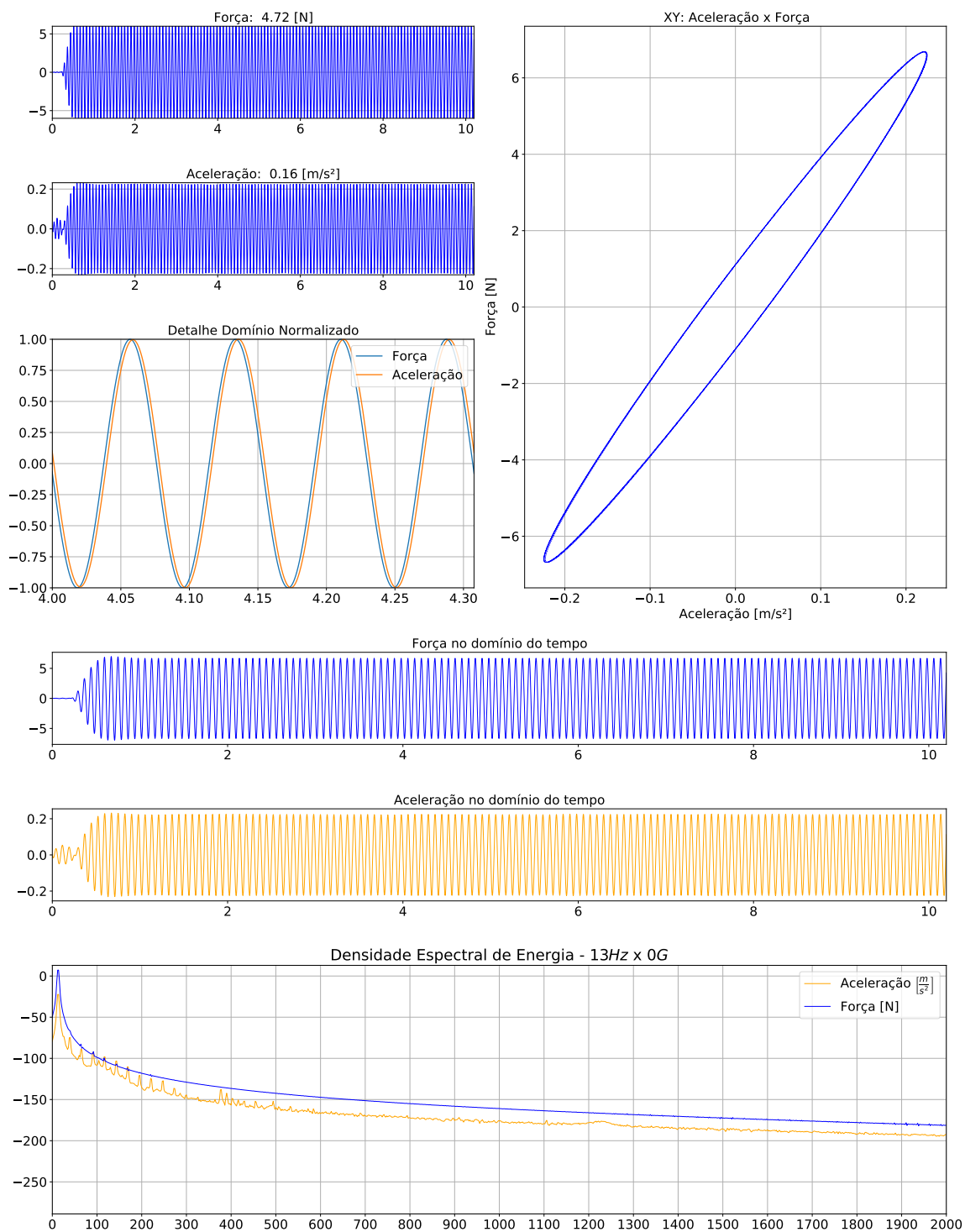
Para aquisição da distribuição espectral de energia, imediatamente após o ensaio, também conhecida como “CPSD - cross power spectral density”, a partir do método de “Welch”, com “overlap”, ou sobreposição, de 50% da frequência amostral, com janelamento tipo “Hanning”.

O próximo passo então era a remoção de um nível DC, presente por conta da forma com a qual a fonte atuava. Após essa etapa, calcula-se os valores “RMS” (*Root Mean Squared*) dos ensaios, a fim de controle do ganho do sistema.

Logo após, exibia-se os valores “RMS” da aceleração, força e deslocamento assim como um gráfico no qual se mostrava o comportamento da aceleração, força e da distribuição espectral de energia. Um exemplo, de resultado provisório logo após o ensaio, é mostrado a seguir, na **Figura 19**, como um resultado satisfatório e na **Figura 20** como um resultado insatisfatório.

Figura 19 – Exemplo de resultado preliminar imediatamente após ensaios com resultado aceitável.

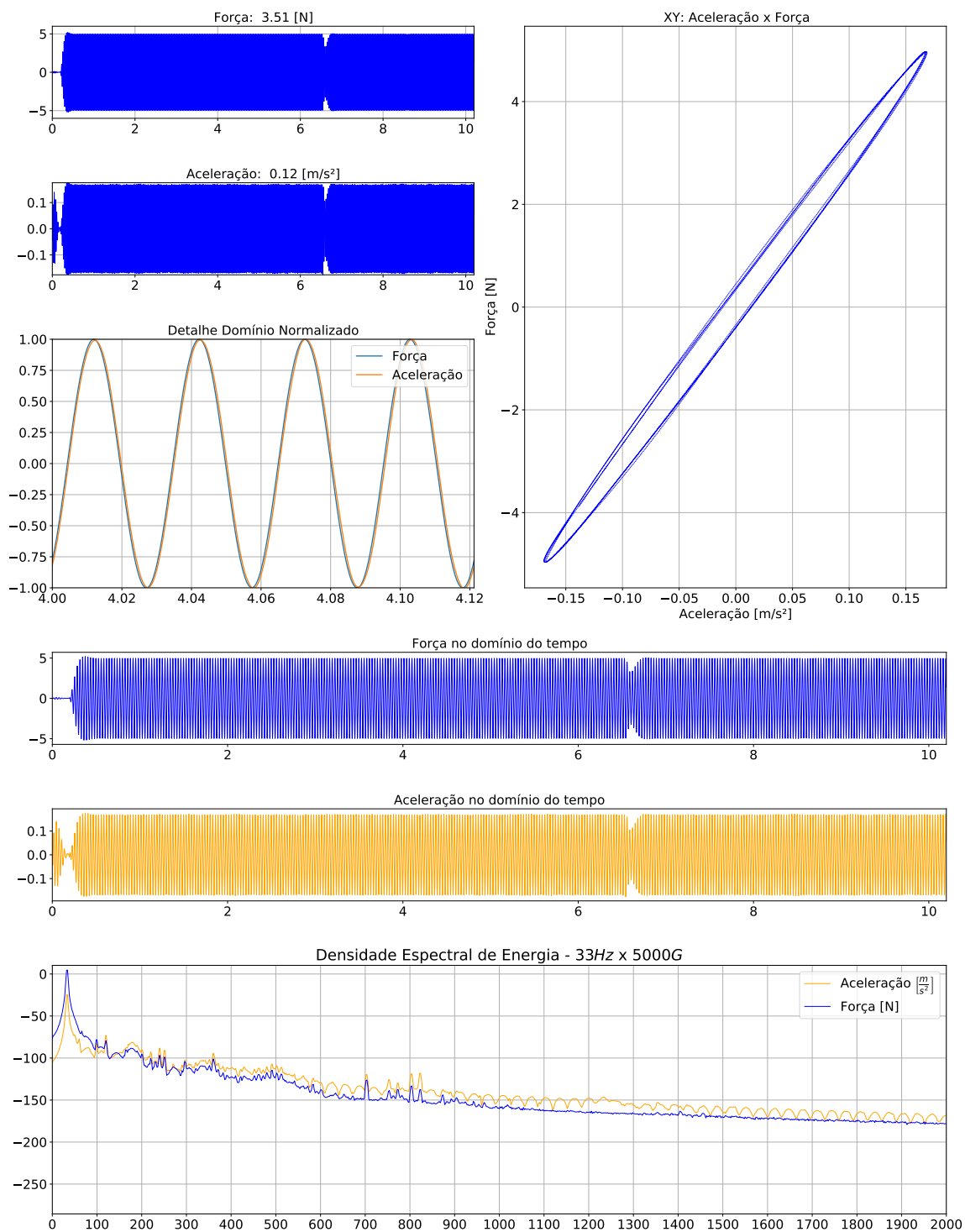
Ensaio com 13Hz e 0G



Fonte – Próprio Autor.

Figura 20 – Exemplo de resultado preliminar imediatamente após ensaios com resultado insatisfatório.

Ensaio com 33Hz e 5000G



Fonte – Próprio Autor.

No exemplo da **Figura 20**, ainda que a “densidade espectral” e a “Aceleração x Força” estivessem aparentemente aceitáveis, e que sejam desprezados os primeiros 4 segundos, como definido, houve um problema de descontinuidade da magnitude da força e da aceleração no espaço considerado para análise, e portanto, a fim de evitar resultados viciados, foi reexecutado o ensaio para as condições mostradas.

3.7 ANÁLISE DOS DADOS

Para se analisar os dados obtidos com os ensaios, desenvolveu-se um código em “*Python*™ 3.8.x” que interpretava os dados salvos em formato proprietário do software do algoritmo de aquisição, “*MATLab*®”.

Para análise carregavam-se os arquivos com as mesmas frequências de excitação para todos os campos utilizados, de 0 a $0,5000T$. Com os dados, já com o filtro aplicado pelo software “*MATLab*®”, carregados no algoritmo desenvolvido em “*Python*”, dar-se-a o início do tratamento dos mesmos.

Os parâmetros escolhidos para análise dos resultados foram os mesmos do ensaio preliminar, para se obter a densidade espectral de energia, “CPSD”, ou seja, utilizando-se o método de “Welch”, com “overlap”, ou sobreposição, de 50% da frequência amostral, com janelamento tipo “Hanning”.

Após tratar de todos os dados, e remover os ruídos com o filtro indicado, começou então a analisar as possíveis variações, sendo as variáveis analisadas de forma independente: frequência de excitação, campo e a comparação com resultados, com as mesmas especificações de fração volumétrica e parâmetros de ensaio, de um MRE sem o alinhamento do particulado ferromagnético.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo serão tratados os resultados e a discussão dos dados obtidos durante os ensaios. Sendo o ensaio feito seguindo-se o indicado no **Capítulo 3**. Todas as amostras de MRE foram testadas a partir do estado de equilíbrio, e os dados, coletados com o sistema e algoritmo de aquisição explicitados anteriormente.

4.1 TENSÃO DE CISALHAMENTO E ÂNGULO DE FASE

Atentando-se a tomar como sinal não defasado a entrada, em forma de força, e utilizando-se das dimensões do aparato para transformá-la em tensão de cisalhamento, τ , deve-se considerar ainda que a saída obtida do sistema é de uma aceleração e, portanto, deve ser integrada duas vezes para que consigamos obter o deslocamento e de forma direta a deformação γ , para que encontremos a fase entre os sinais.

De modo a facilitar a visualização, escolheu-se então agregar numa mesma figura, todas as fases de uma mesma frequência e mostrar na própria imagem a defasagem daquele sinal.

4.1.1 Resultados para frequência de excitação de 5Hz

Figura 21 – Loops de histerese num gráfico de tensão contra deformação de cisalhamento para uma frequência de $5Hz$ sob várias densidades de campo magnético sem aplicação de campo magnético durante a cura.

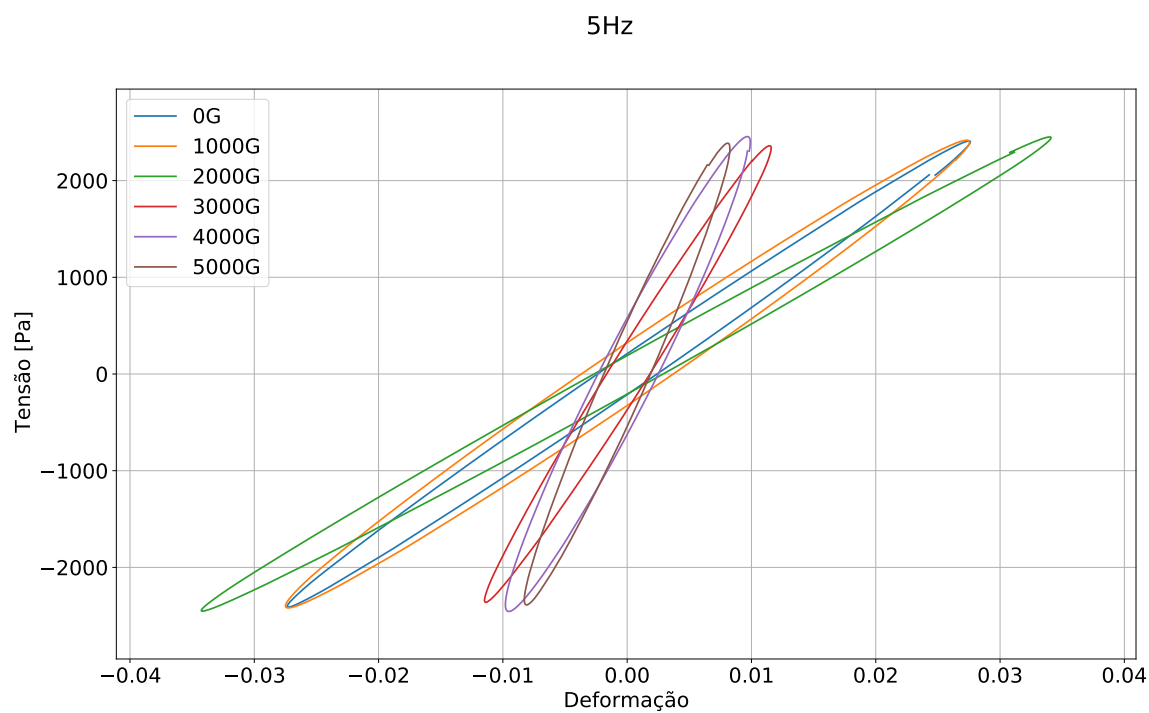
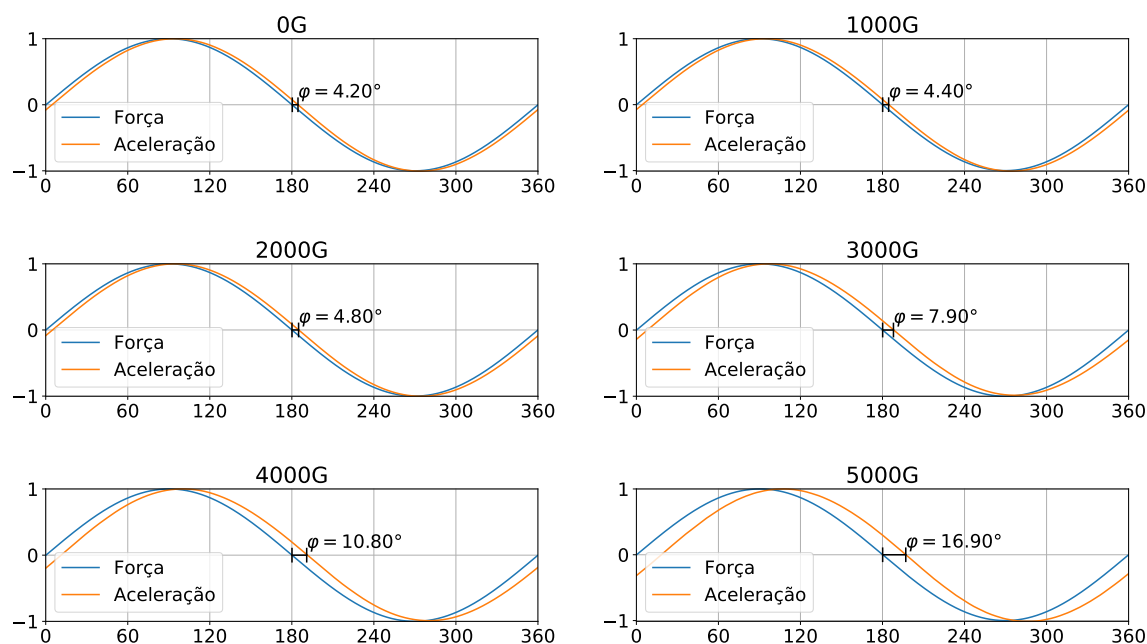


Figura 22 – Ângulo de fase para cada um dos campos aplicados com excitação de $5Hz$ sem aplicação de campo magnético durante a cura.

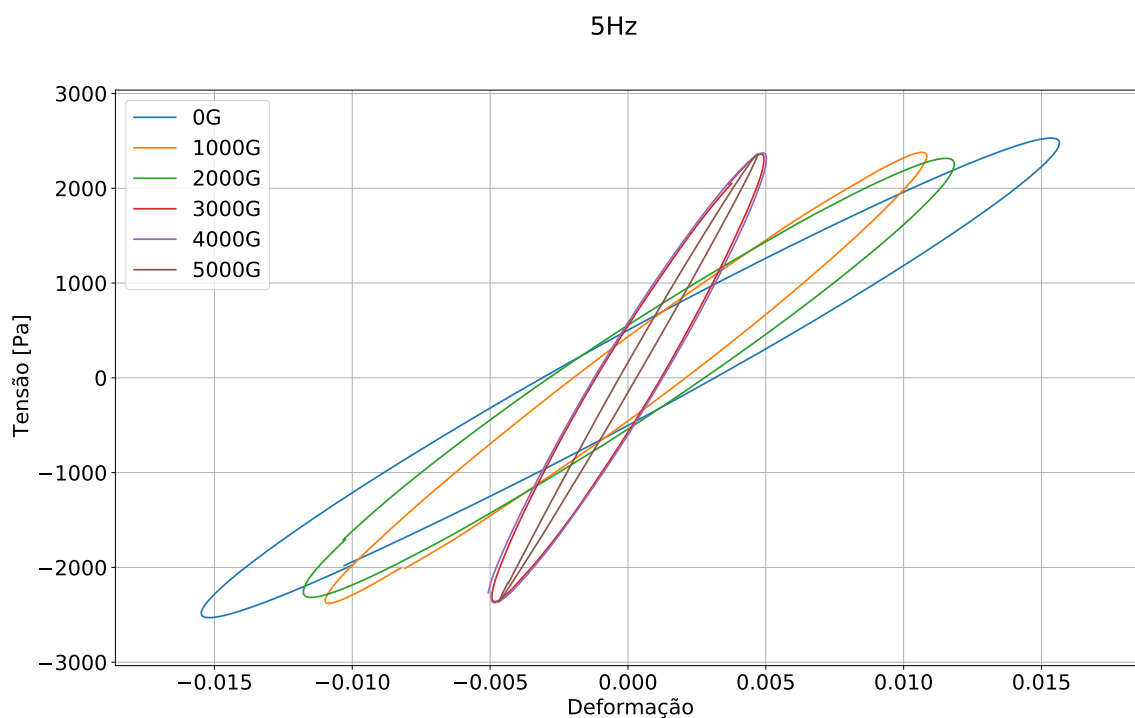


Fonte – Próprio autor

Da **Figura 21**, é possível identificar se comportamento é mais elástico ou viscoso. Embora as amplitudes de tensão se mantenham as mesmas, as amplitudes de deformação diminuem com o aumento da intensidade de campo magnético aplicado, indicativo de um aumento na rigidez do material. Este aumento da rigidez do material, com um aumento da fase, infere que houve um aumento do amortecimento, uma vez que a rigidez é proporcional ao módulo de perdas, como mostrado na **Figura 11**, ainda desse mesmo fato uma aumento da fase proporciona um aumento do módulo de perdas, o que indica um aumento no amortecimento.

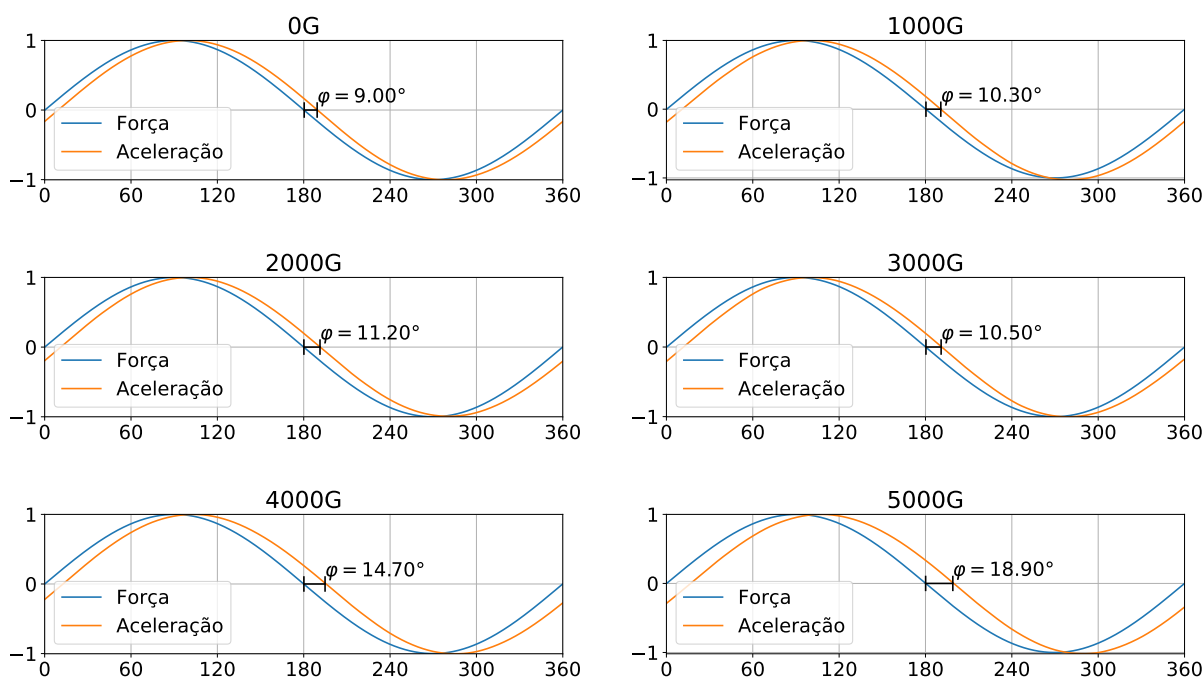
A **Figura 22** mostra a forma senoidal da força e deslocamento, normalizadas, utilizadas para se encontrar a fase entre os sinais, sendo a translação entre as ondas a defasagem entre os sinais. Pode-se ainda identificar que de acordo com o aumento da intensidade do campo, também ocorre um aumento na fase.

Figura 23 – Loops de histerese num gráfico de tensão contra deformação de cisalhamento para uma frequência de $5Hz$ sob várias densidades de campo magnético com aplicação de campo magnético durante a cura..



Fonte – Próprio autor

Figura 24 – Ângulo de fase para cada um dos campos aplicados com excitação de $5Hz$ com aplicação.



Fonte – Próprio autor

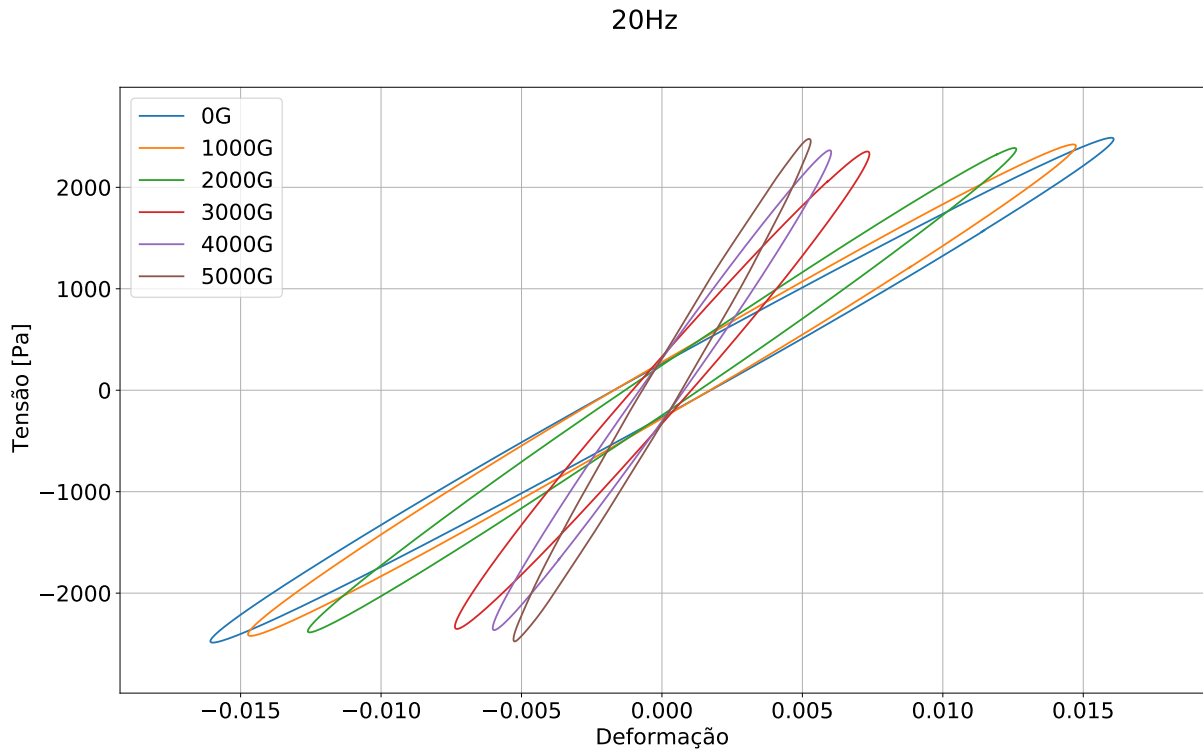
A **Figura 23** tem algumas similaridades com a **Figura 21**. Ambas possuem mesmo nível de tensões, que também se mantém constante, sendo este o comportamento esperado, uma vez que os níveis de força usados em ambos os ensaios foram os mesmos. Há também o fato de que a amplitude de deformação em ambos os casos diminui com o aumento do campo magnético aplicado o que indica aumento da rigidez.

Entretanto, nota-se que desde o estado sem aplicação de campo, para $5Hz$ já há um aumento significativo na rigidez do sistema, em torno de 81% , somente com a aplicação do campo durante o processo de cura, de $43,8 \frac{MN}{m}$ para $79,4 \frac{MN}{m}$. Já o aumento em relação a aplicação de campo, ficaram em patamares parecidos, para o caso sem campo durante a cura, um aumento de 221% , para $140,7 \frac{MN}{m}$, e para o caso com aplicação de campo durante a cura em torno de 217% , para $251,6 \frac{MN}{m}$. A rigidez então pela aplicação do campo durante a cura é de até 79% , com a aplicação de um campo magnético com intensidade de $5000G$ durante o ensaio.

Quando comparamos então a **Figura 24** com a **Figura 22**, percebe-se uma aumento no ângulo de fase, mesmo no ensaio sem campo magnético aplicado, o que indica um aumento no módulo de perdas, G'' , relacionado a um aumento no amortecimento.

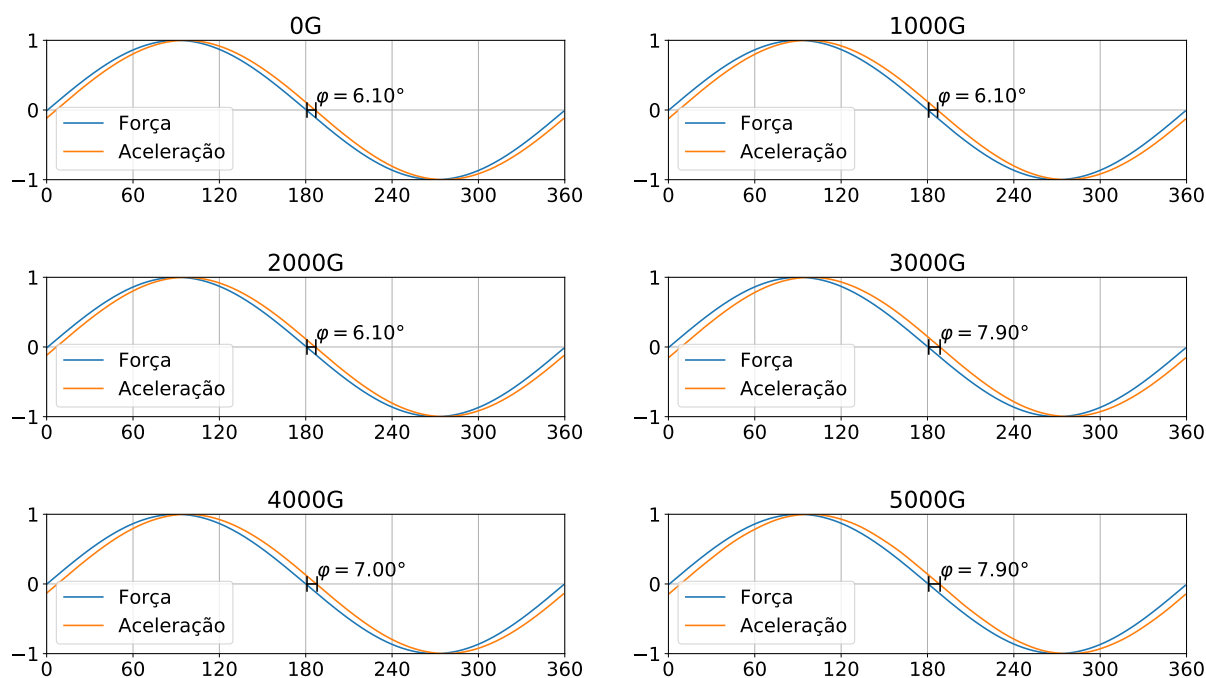
4.1.2 Resultados para frequência de excitação de 20Hz

Figura 25 – Loops de histerese num gráfico de tensão contra deformação de cisalhamento para uma frequência de $20Hz$ sob várias densidades de campo magnético sem aplicação de campo magnético durante a cura.



Na **Figura 25**, vemos o mesmo comportamento da **Figura 21**, entretanto, percebe-se que ainda que naturalmente exista um aumento da rigidez do sistema, de $43,8 \frac{MN}{m}$ para $76,8 \frac{MN}{m}$, a rigidez máxima, em $5000G$, tem um ganho de cerca de 202%, em relação ao ensaio sem campo magnético, chegando a $231,7 \frac{MN}{m}$.

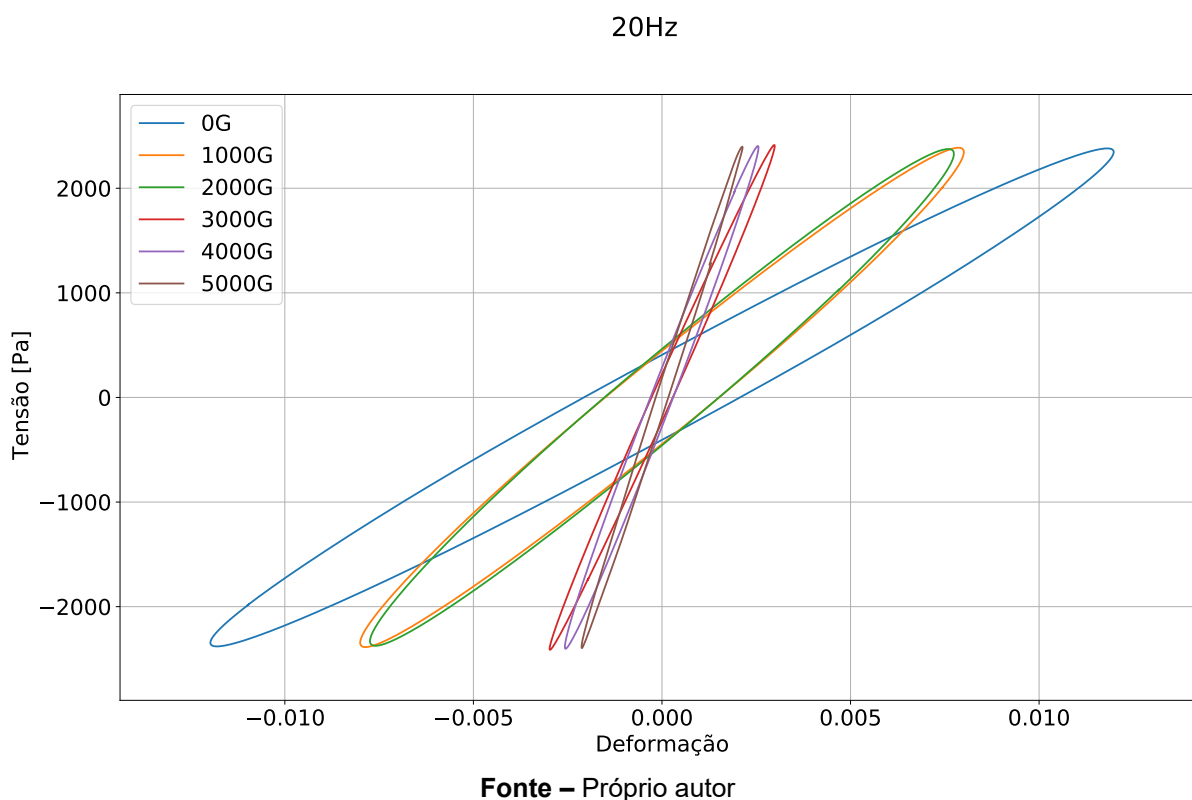
Figura 26 – Ângulo de fase para cada um dos campos aplicados com excitação de $20Hz$ sem aplicação de campo magnético durante a cura.



Fonte – Próprio autor

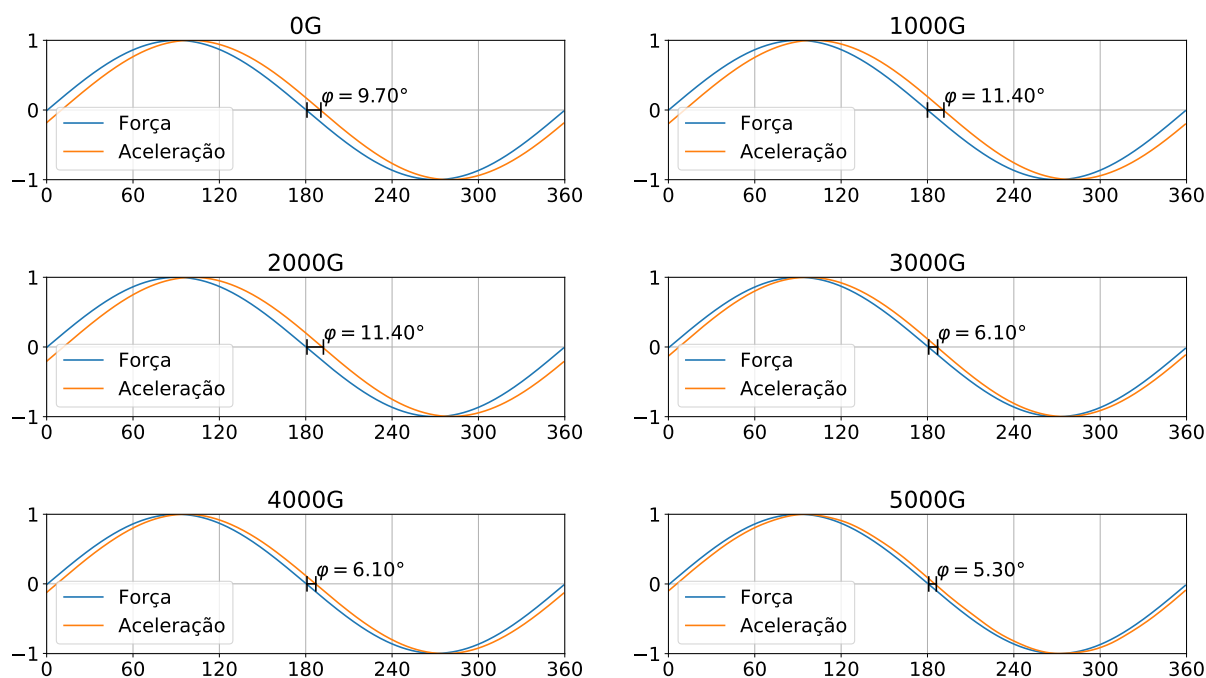
Nota-se ao comparar a **Figura 26** contra a **Figura 22**, uma tendência de diminuição das respectivas fases, indicando que o comportamento passou a ser mais elástico do que antes, como resultado de uma redução em G'' proporcionada pela aplicação de campo magnético durante a cura do elastômero.

Figura 27 – Loops de histerese num gráfico de tensão contra deformação de cisalhamento para uma frequência de $20Hz$ sob várias densidades de campo magnético com aplicação de campo magnético durante a cura.



Na **Figura 27** temos os loops de histerese para a excitação de $20Hz$, comparando-os com os da **Figura 25**, nota-se que, novamente, mesmo sem aplicação posterior, durante o ensaio, de campo magnético, a rigidez do material aumentou, indicado pela diminuição da amplitude da deformação, que indica um aumento da inclinação da elipse, que corresponde a rigidez. Para o caso sem aplicação de campo durante a cura a rigidez era de $76,8 \frac{MN}{m}$, já para o caso no qual foi aplicado campo magnético durante a cura, o valor encontrado foi de $97,7 \frac{MN}{m}$, um aumento de 27% em relação à anterior.

Figura 28 – Ângulo de fase para cada um dos campos aplicados com excitação de $20Hz$ com aplicação de campo magnético durante a cura.

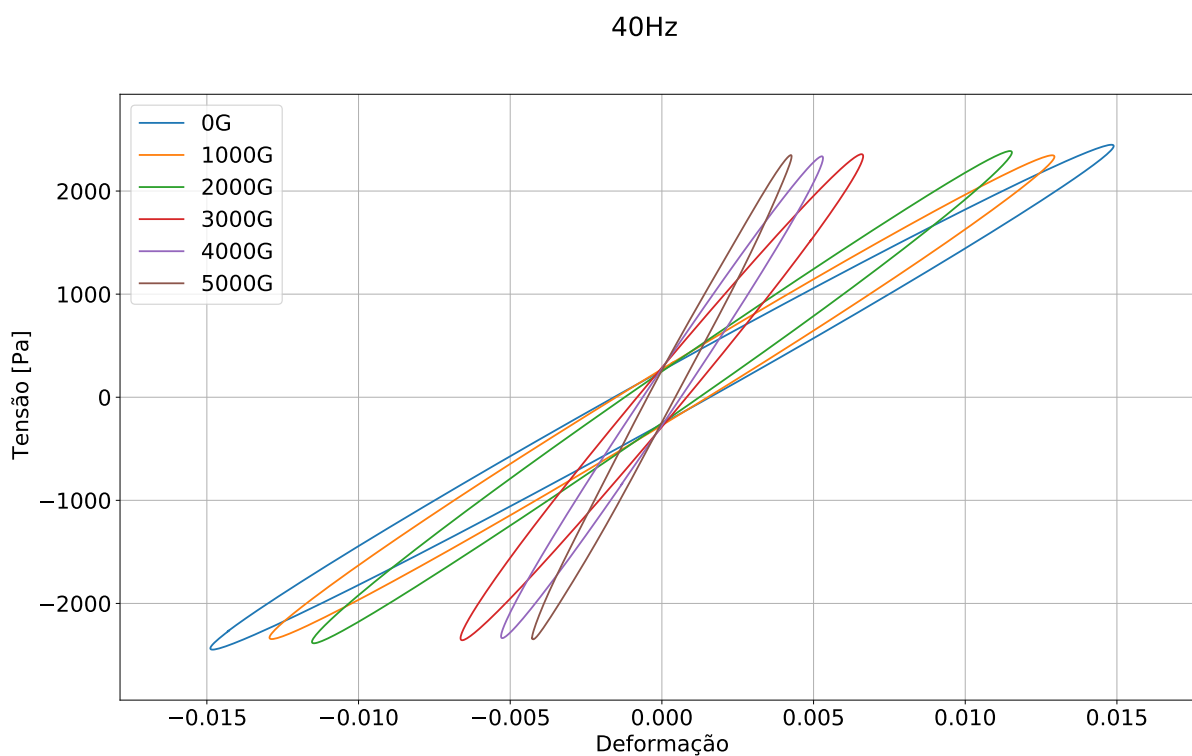


Fonte – Próprio autor

A **Figura 28** mostra um novo comportamento da fase do sistema, diferentemente dos casos anteriores, há presença de um pico entre $1000G$ e $2000G$, com posterior redução à níveis inferiores ao sem presença de campo, indicando um comportamento que tende mais para o elástico do que para o viscoso.

4.1.3 Resultados para frequência de excitação de 40Hz

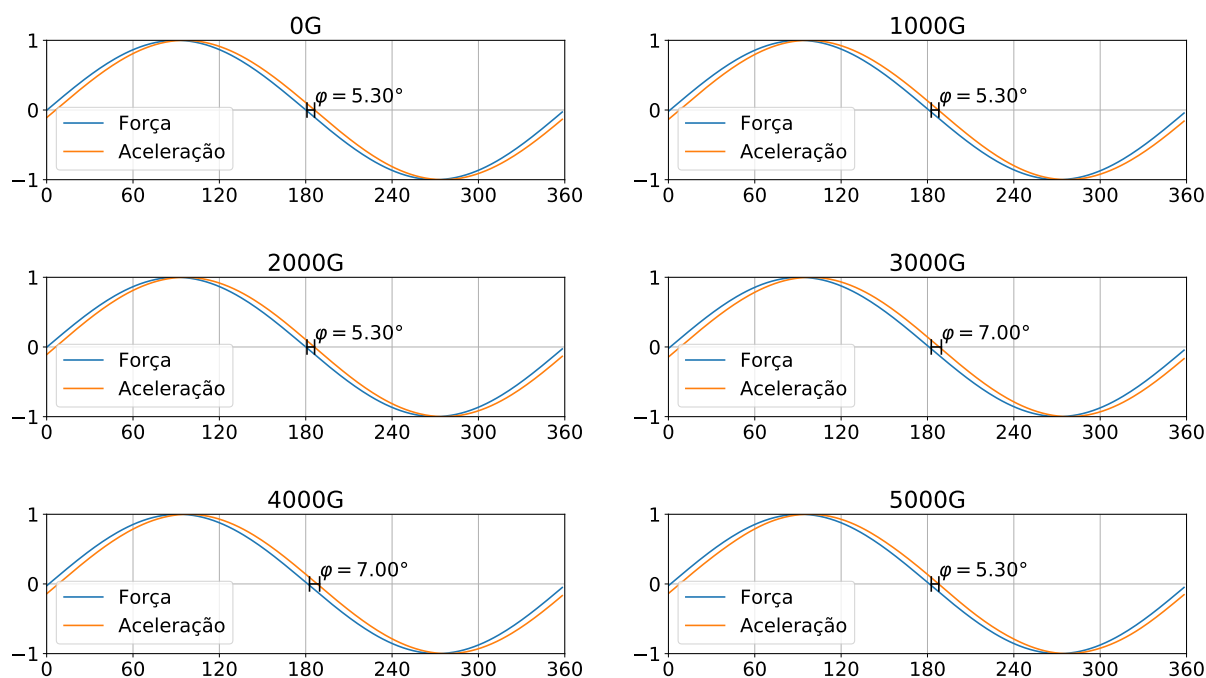
Figura 29 – Loops de histerese num gráfico de tensão contra deformação de cisalhamento para uma frequência de $40Hz$ sob várias densidades de campo magnético sem aplicação de campo magnético durante a cura.



Fonte – Próprio autor

Vemos na **Figura 29**, o comportamento do material se alterar, passando para um estado mais elástico, devido a redução da espessura das elipses, percebemos ainda que a rigidez, em relação ao ensaio de $20Hz$, aumentou de $76,8 \frac{MN}{m}$ para $81,7 \frac{MN}{m}$ sem aplicação de campo durante o ensaio, tal comportamento se manteve para com aplicação de campo durante o ensaio, o que indica que o material possui uma rigidez maior para vibrações em $40Hz$ do que em $20Hz$.

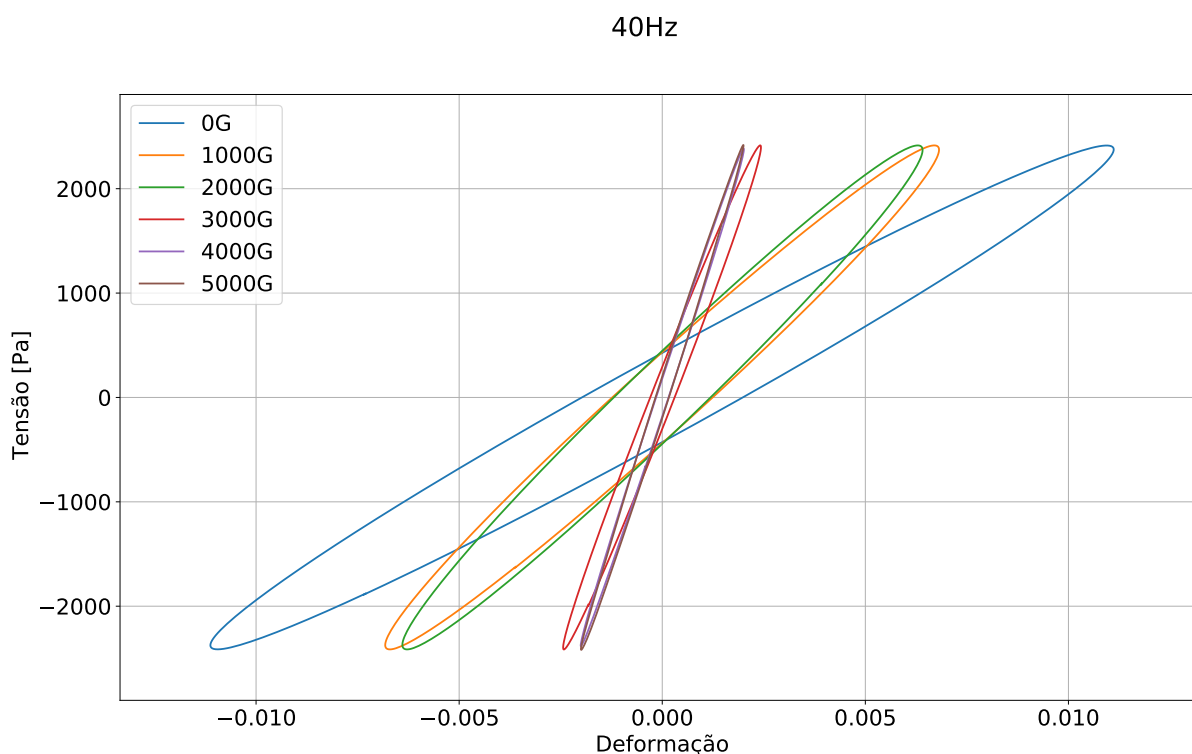
Figura 30 – Ângulo de fase para cada um dos campos aplicados com excitação de $40Hz$ sem aplicação de campo magnético durante a cura.



Fonte – Próprio autor

Como indicado pela **Figura 29**, a **Figura 30** mostra a redução da fase para um patamar mais baixo, que se mantem com poucas alterações durante a variação de campo, isto é indicativo de que em $40Hz$, e provavelmente nos ensaios com maiores frequências, o material passa a ter um comportamento mais elástico do que viscoso.

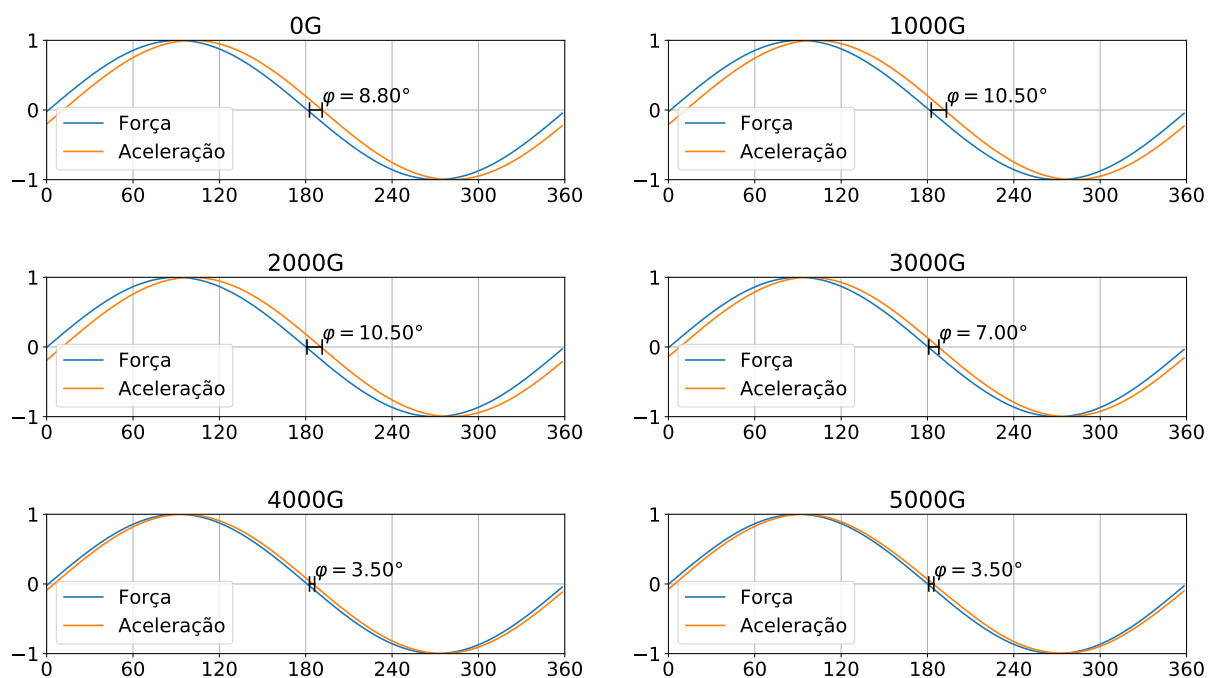
Figura 31 – Loops de histerese num gráfico de tensão contra deformação de cisalhamento para uma frequência de $40Hz$ sob várias densidades de campo magnético com aplicação de campo magnético durante a cura.



Fonte – Próprio autor

Para o ensaio com aplicação de campo magnético durante a cura para $40Hz$, como mostrado na **Figura 31**, entretanto, a rigidez do material atingiu um máximo com $4000G$, sendo que um posterior aumento para $5000G$ não causou aumento significativo da mesma, o que sugere que para certo grau de vibração o material pode ter um intervalo menor variação de campo, por atingir suas propriedades mecânicas máximas de forma mais rápida, com menor aplicação de campo do que no mesmo caso sem aplicação de campo magnético durante a cura.

Figura 32 – Ângulo de fase para cada um dos campos aplicados com excitação de $40Hz$ com aplicação de campo magnético durante a cura.

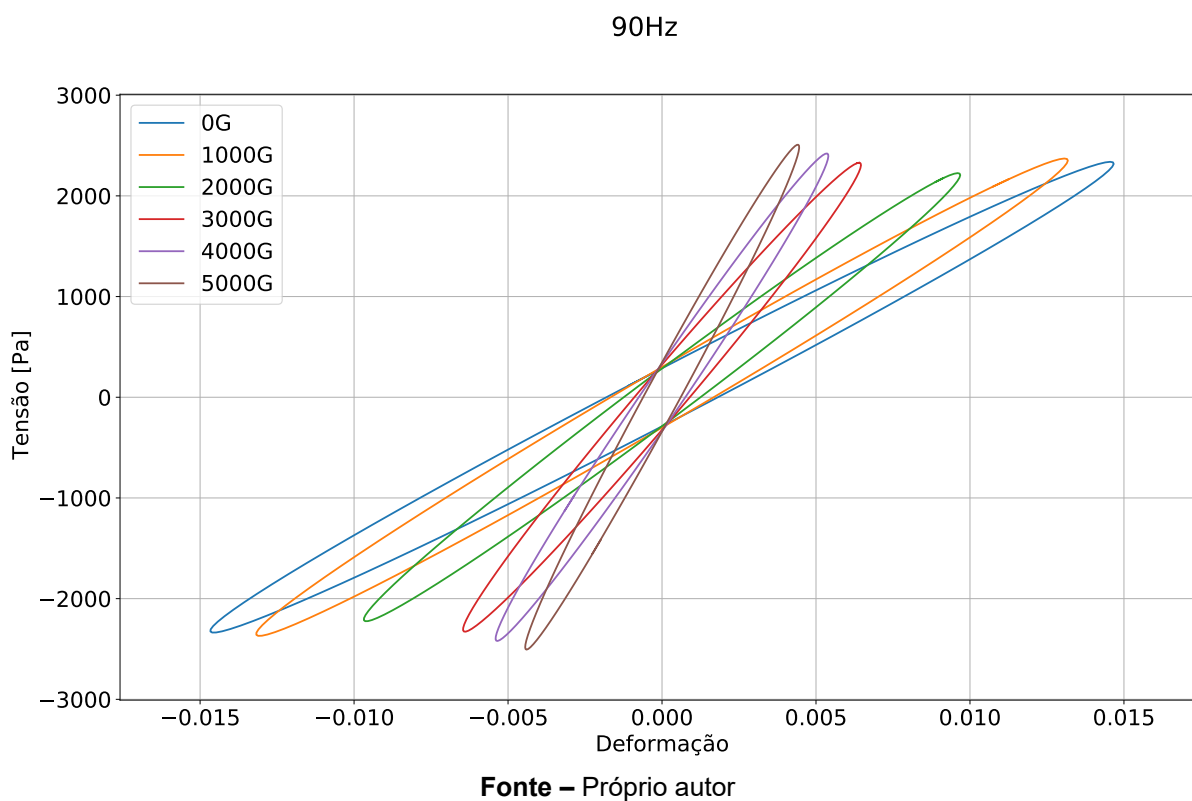


Fonte – Próprio autor

A **Figura 32** mostra que após atingir o pico de rigidez, de $591,1 \frac{MN}{m}$ em $4000G$, a fase não sofre mais alterações também, indicando uma resposta uniforme do material para campos maiores do que $4000G$ na frequência de ensaio de $40Hz$.

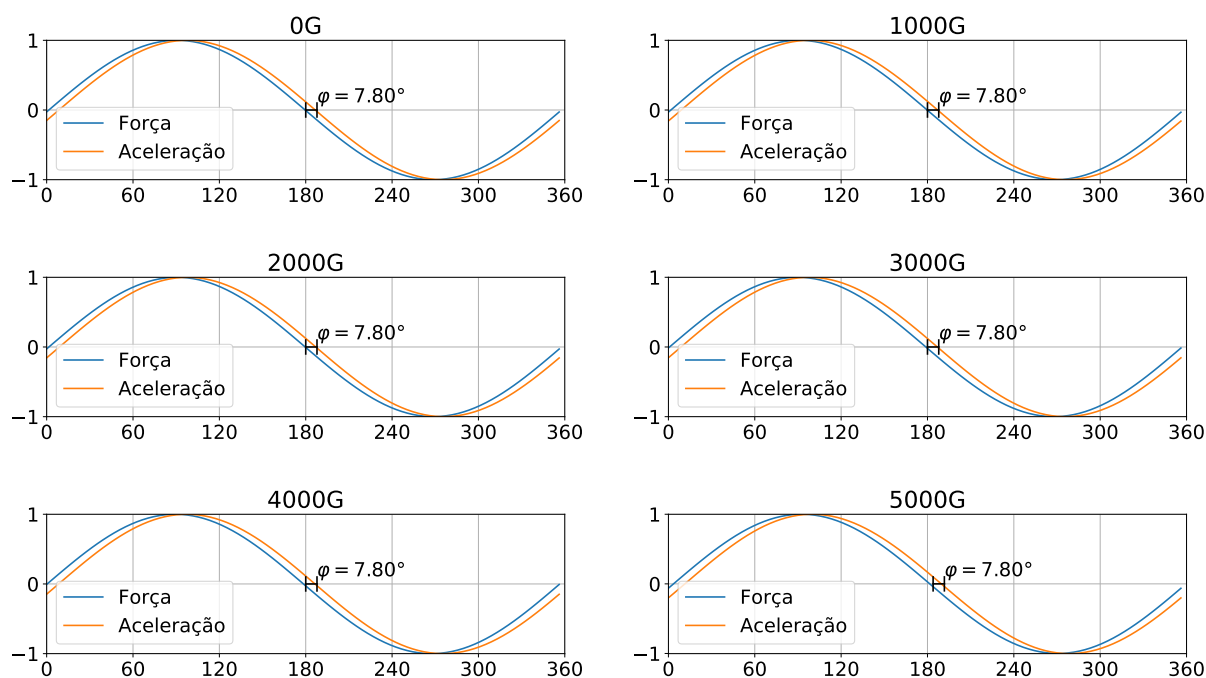
4.1.4 Resultados para frequência de excitação de 90Hz

Figura 33 – Loops de histerese num gráfico de tensão contra deformação de cisalhamento para uma frequência de $90Hz$ sob várias densidades de campo magnético sem aplicação de campo magnético durante a cura.



Ao se atingir a marca de $90Hz$, para o caso sem aplicação de campo magnético no processo de cura, ainda não foi atingido o limite superior de aumento de rigidez pela alteração de campo magnético durante o ensaio, o que indica que a não aplicação de campo magnético durante a cura reduza a sensibilidade das propriedades ao campo magnético aplicado, ou seja, o MRE necessita de uma maior aumento no campo para atingir seu valor limite para rigidez.

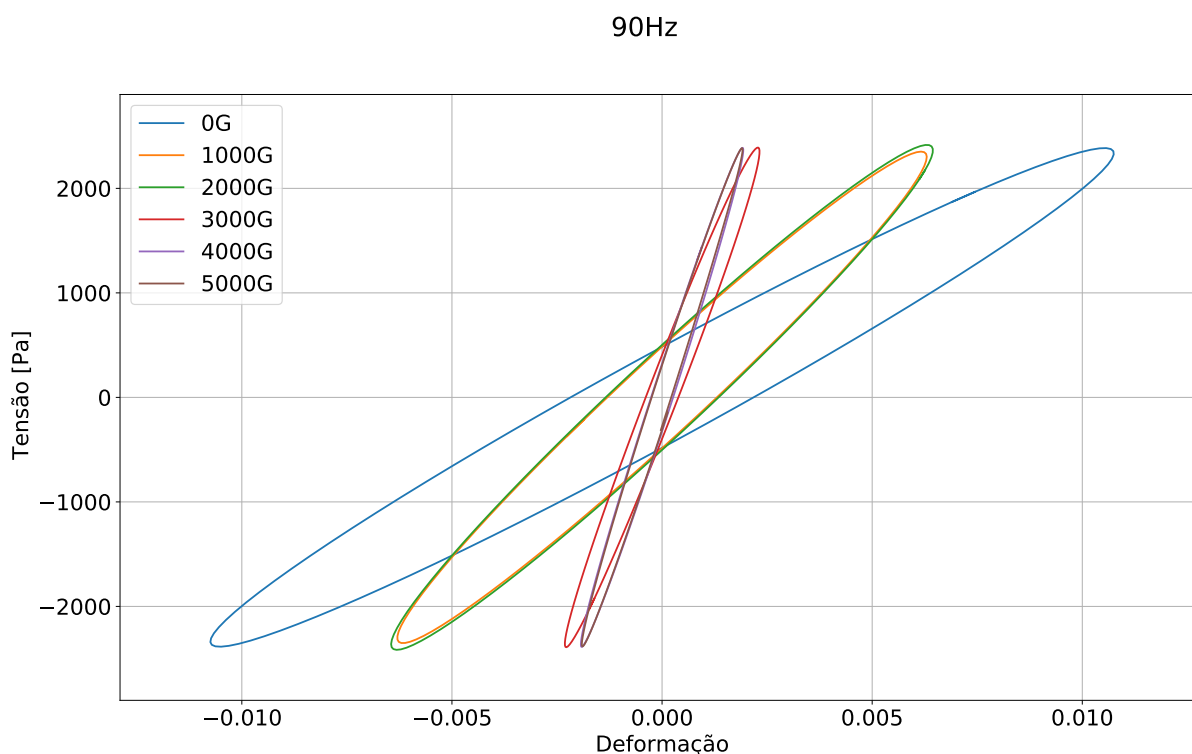
Figura 34 – Ângulo de fase para cada um dos campos aplicados com excitação de $90Hz$ sem aplicação de campo magnético durante a cura.



Fonte – Próprio autor

A **Figura 34** mostra por sua vez, que existiu uma elevação e estabilização de fase no sistema, do ensaio em mesmas condições em $40Hz$, indicando que o material se comporta mais viscosamente de forma homogênea com o aumento da frequência de excitação.

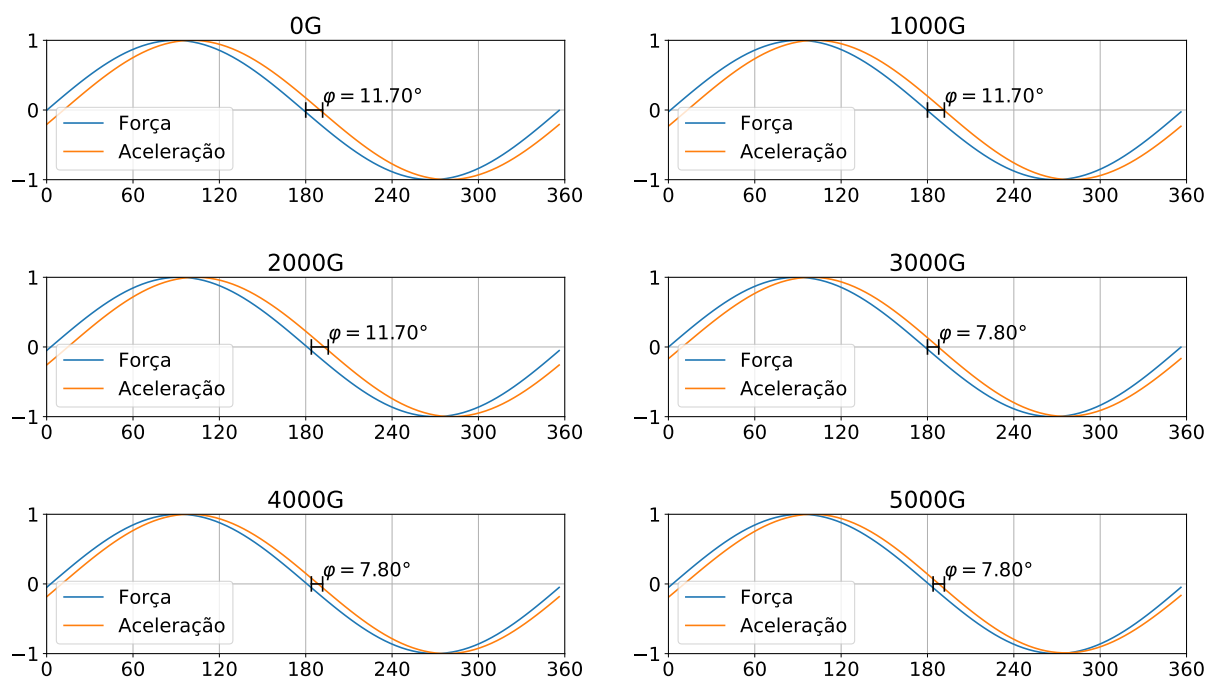
Figura 35 – Loops de histerese num gráfico de tensão contra deformação de cisalhamento para uma frequência de $90Hz$ sob várias densidades de campo magnético com aplicação de campo magnético durante a cura.



Fonte – Próprio autor

Reforçando o comportamento em $40Hz$, a **Figura 35** mostra que existe uma saturação em $4000G$, sendo que posterior aumento do campo não resultou num maior aumento da rigidez já atingida.

Figura 36 – Ângulo de fase para cada um dos campos aplicados com excitação de $90Hz$ com aplicação de campo magnético durante a cura.

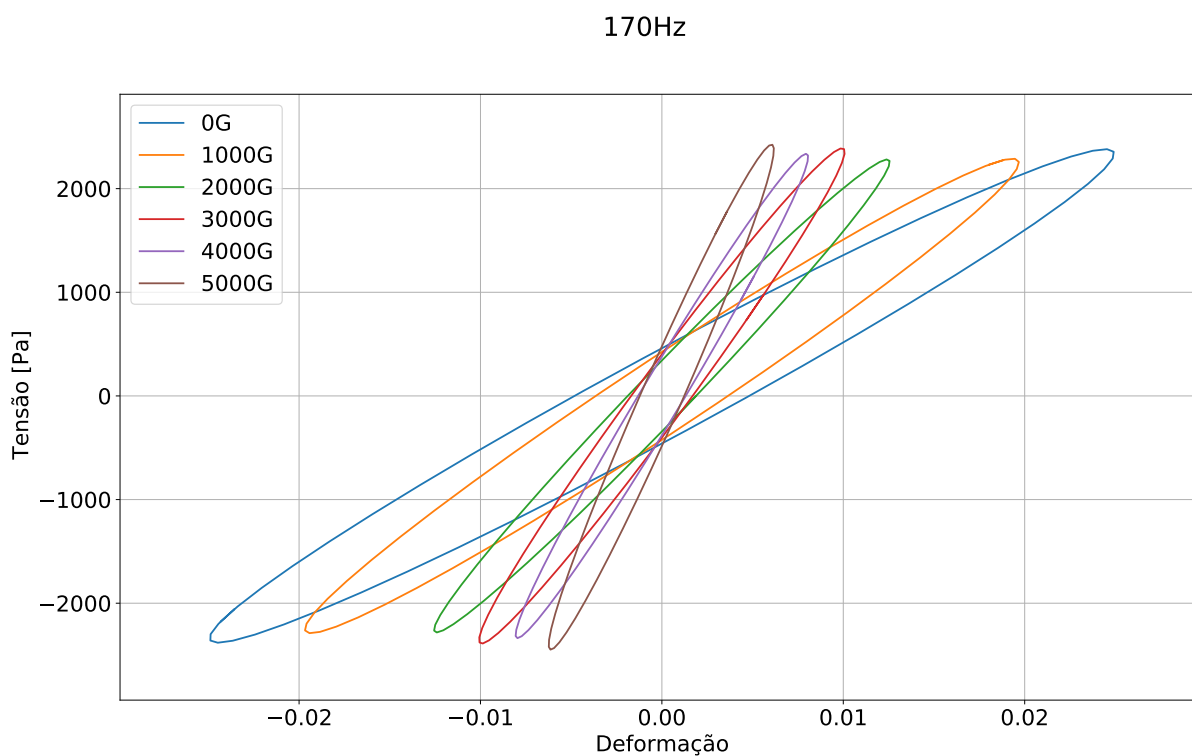


Fonte – Próprio autor

A mudança, entretanto, em relação a não aplicação de cura no material, é que enquanto nesta frequência, sem cura a fase encontra-se estabilizada, com a aplicação de campo magnético durante a cura, a fase tem um ponto, após $2000G$, em que ela apresenta uma queda indicando um aumento da propriedade elástica do material, que condiz com uma redução no módulo de perdas, que será analisada mais a frente.

4.1.5 Resultados para frequência de excitação de 170Hz

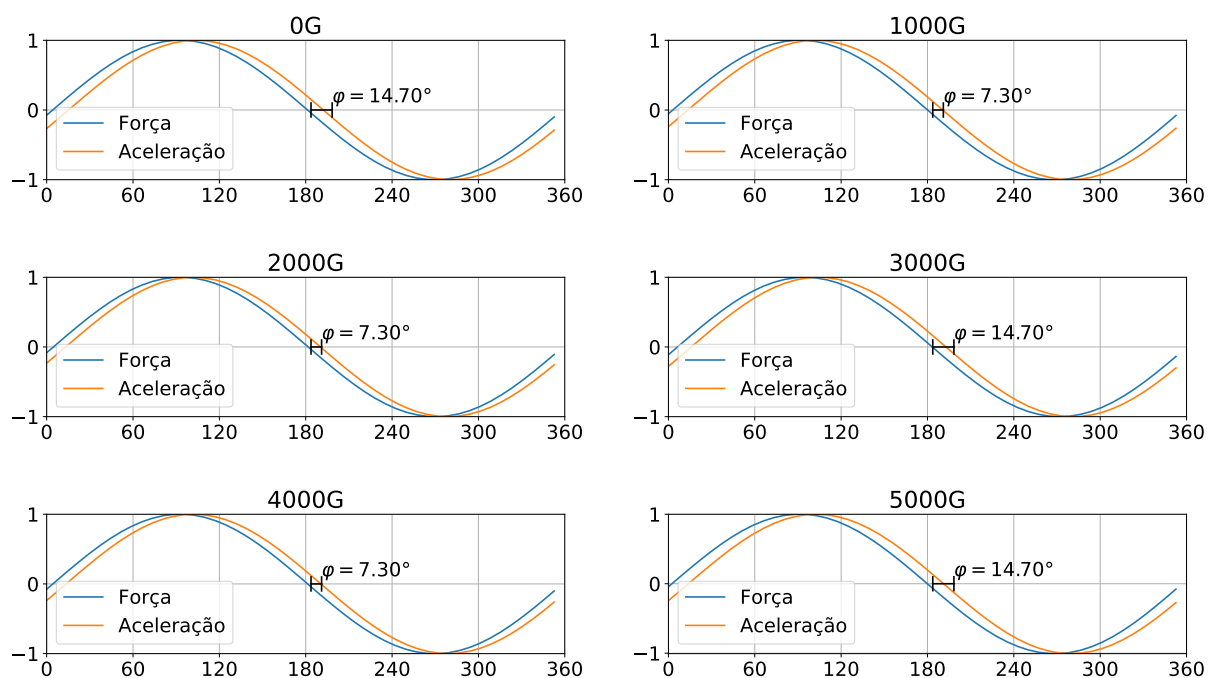
Figura 37 – Loops de histerese num gráfico de tensão contra deformação de cisalhamento para uma frequência de 170Hz sob várias densidades de campo magnético sem aplicação de campo magnético durante a cura.



Fonte – Próprio autor

Da **Figura 37**, nota-se que a saturação, já presente com a aplicação de campo magnético durante a cura, não ocorreu ainda para o caso da cura sem a presença de campo. No entanto, o comportamento de redução de amplitude de deformações, consequente do aumento de rigidez, ainda se faz presente.

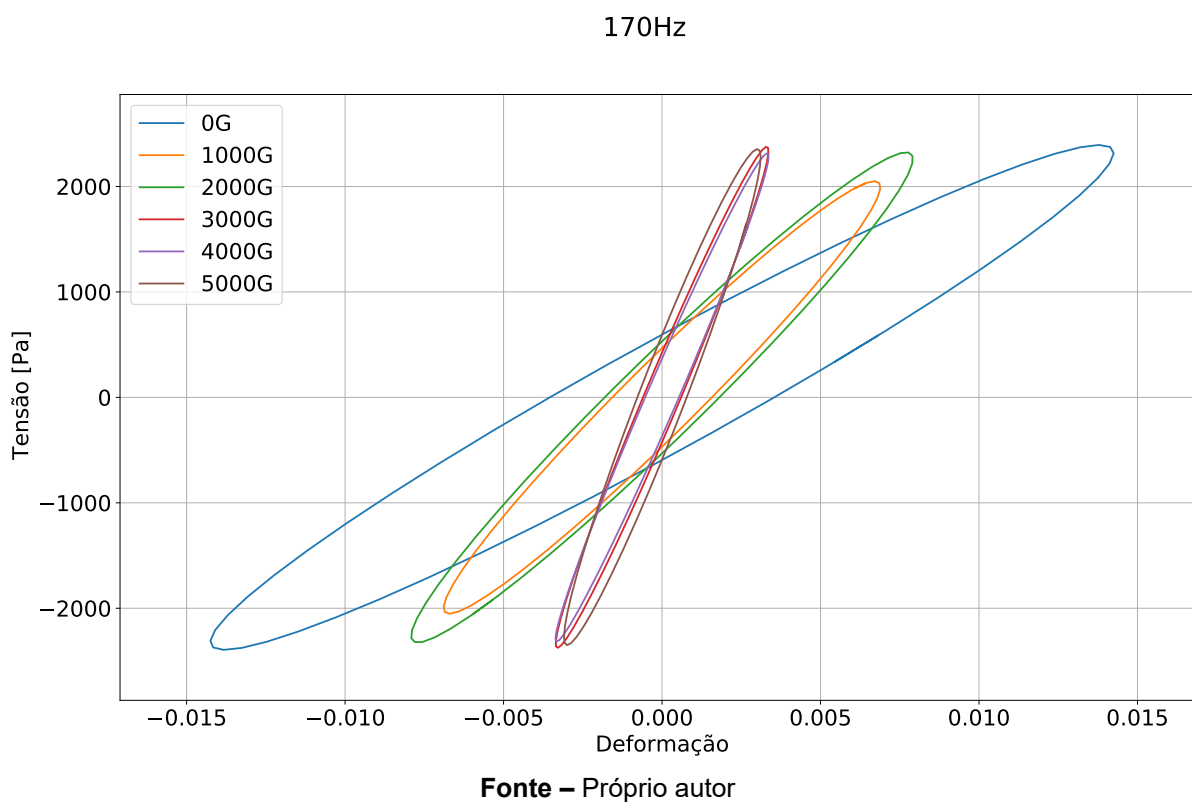
Figura 38 – Ângulo de fase para cada um dos campos aplicados com excitação de 170Hz sem aplicação de campo magnético durante a cura.



Fonte – Próprio autor

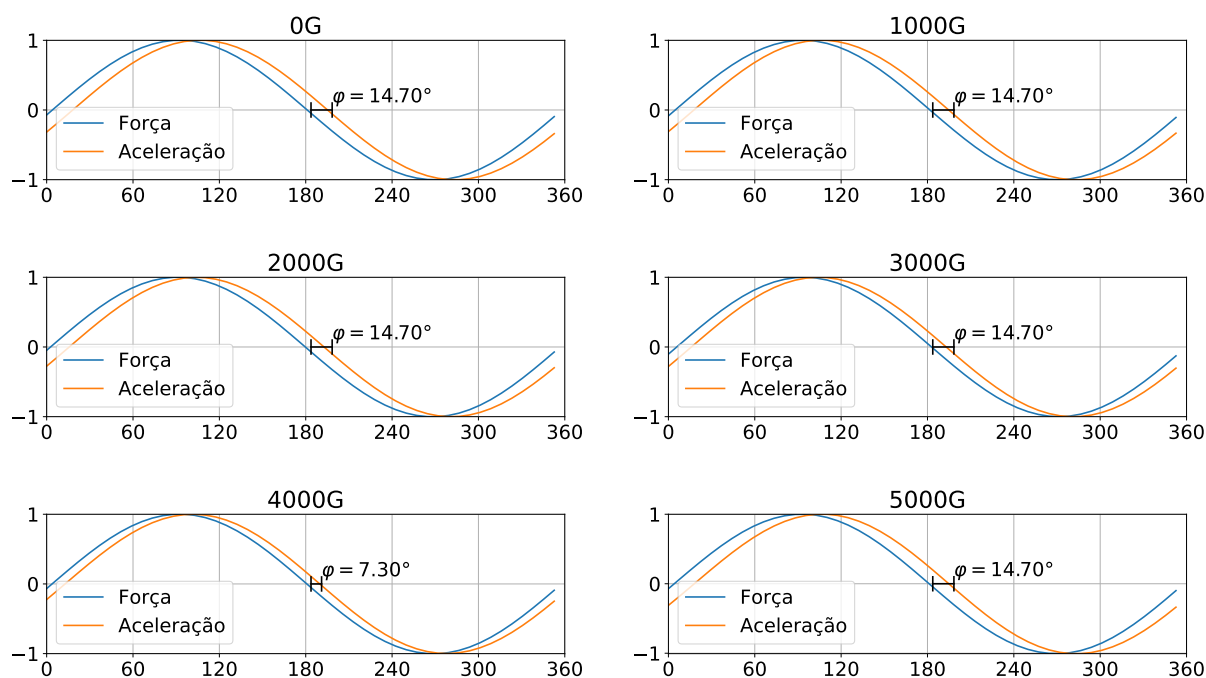
A fase neste caso, apresentada na **Figura 38**, apresenta um comportamento de variar em torno de um ponto de equilíbrio, indicando que provavelmente o valor real da fase se encontra entre os intervalos de campo ensaiados.

Figura 39 – Loops de histerese num gráfico de tensão versus deformação de cisalhamento para uma frequência de 170Hz sob várias densidades de campo magnético com aplicação de campo magnético durante a cura.



Da **Figura 39**, percebemos que a saturação agora, ocorre ainda mais cedo, perto de 3000G , indicando que não somente a aplicação de campo durante a saturação aumenta a amplitude da variação de rigidez, como diminui a intensidade de campo necessária para que ela ocorra, atingindo mais rapidamente o valor limite de rigidez em relação ao campo magnético aplicado.

Figura 40 – Ângulo de fase para cada um dos campos aplicados com excitação de $170Hz$ com aplicação de campo magnético durante a cura.



Fonte – Próprio autor

A **Figura 40**, por sua vez, mostra que, embora com um desvio em $4000G$, originário da não-linearidade do material, tenha ocorrido, a mesma se mantém em um mesmo patamar, igual ou superior ao caso da amostra que não sofreu aplicação de campo magnético durante o processo de cura, o que por sua vez indica, pela existência dessa maior fase, uma maior propriedade viscosa, que se relaciona com uma maior dissipação de energia em altas frequências.

4.1.6 Saturação da amostra sem aplicação de campo durante a cura

A fim de se buscar o ponto em que ocorreria a saturação em tal amostra, ensaiou-se a mesma até o limite do sistema de ensaios, de $260Hz$, não sendo possível encontrar o mesmo, entretanto o que acabou por se encontrar foi a presença de uma ressonância entre $180Hz$ e $200Hz$, sendo que neste intervalo não foram obtidos resultados satisfatórios devido a natureza complexa da ressonância.

Após a ressonância, entretanto o comportamento do material continuou o mesmo, tendo aumentado sua fase indicando mais propriedades viscosas, e portanto uma melhor capacidade de dissipação. O mesmo comportamento sendo encontrado no caso

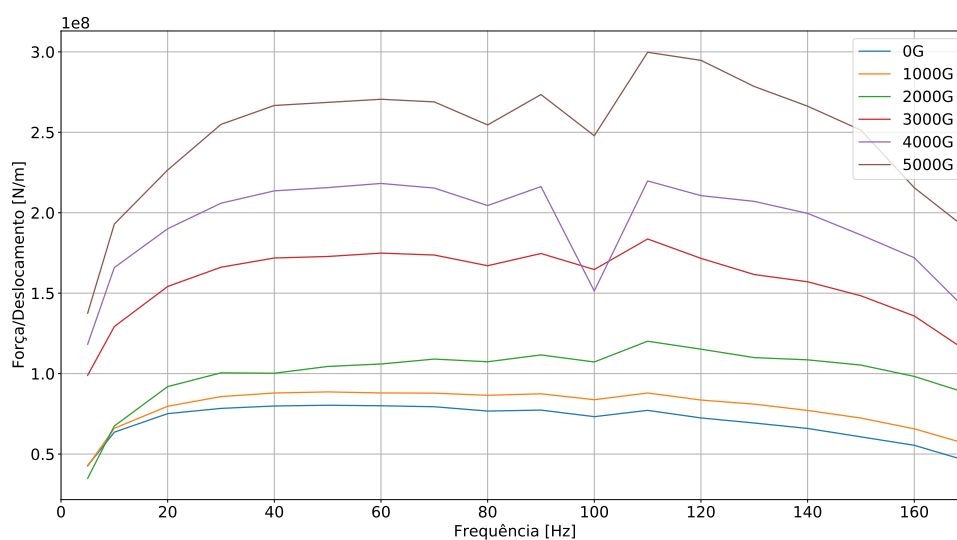
da presença de campo magnético durante o processo de cura, indicando que este comportamento é característico do próprio material.

4.2 RIGIDEZ

Com os resultados provenientes dos ensaios que geraram os dados de tensão de cisalhamento e fase, procedeu-se então a encontrar a rigidez do material em cada um dos casos.

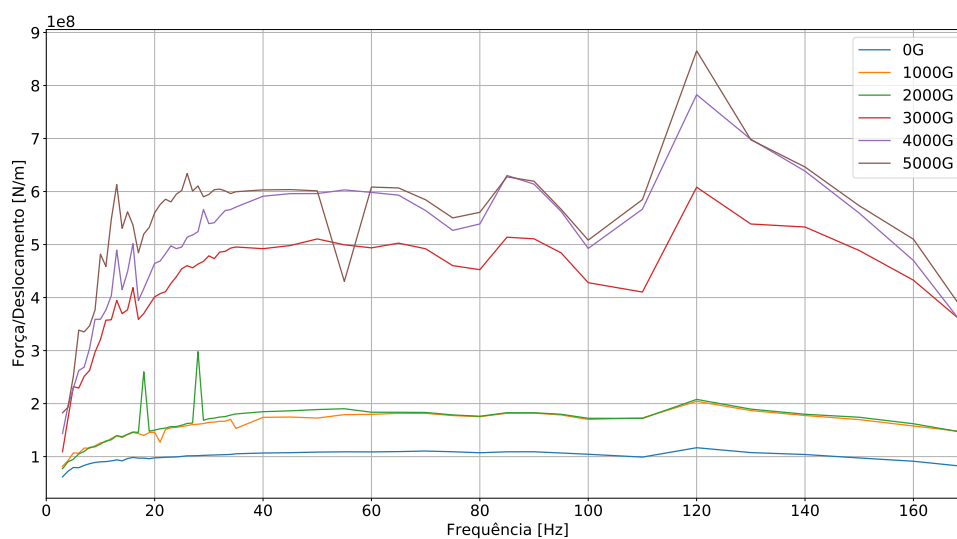
A **Figura 41** apresenta a rigidez encontrada para o sistema que não teve campo magnético durante seu processo de cura, enquanto na **Figura 42** o sistema já teve a aplicação do mesmo.

Figura 41 – Gráfico com os valores obtidos para K, para o sistema sem aplicação de campo magnético durante seu processo de cura, para cada uma das frequências ensaiadas.



Fonte – Próprio Autor.

Figura 42 – Gráfico com os valores obtidos para K, para o sistema com aplicação de campo magnético durante seu processo de cura, para cada uma das frequências ensaiadas.



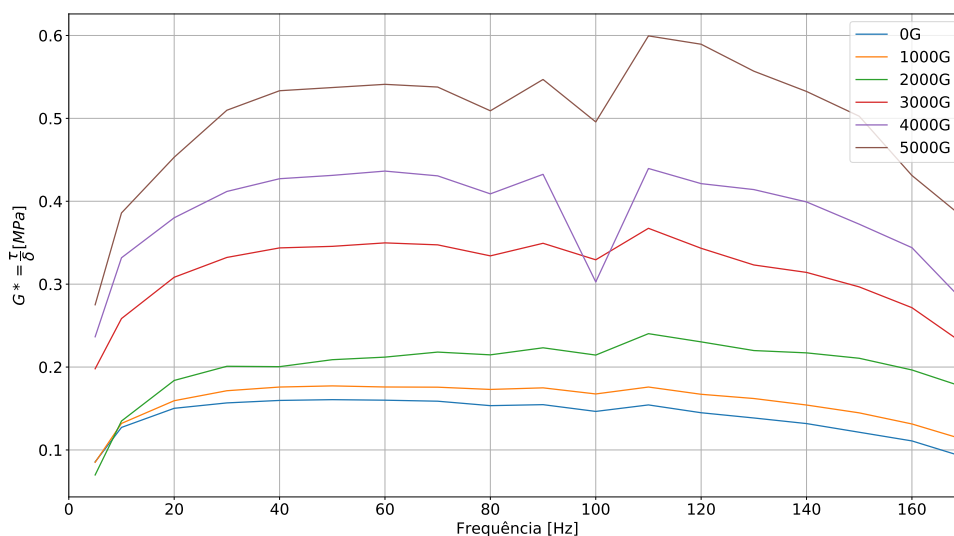
Fonte – Próprio Autor.

Ambas as figuras, **41** e **42**, apresentam formas bem semelhantes, convém ressaltar que a falta de detalhes da primeira, provem de uma seleção de pontos um pouco menor. Outra comparação interessante, é que, tomando por base a rigidez sem campo aplicado, $0G$, a rigidez do sistema dobra pela simples diferença no processo de cura, com a aplicação de campo magnético no MRE, essa diferença aumenta ainda mais, ao compararmos a rigidez em relação ao campo de $5000G$, chegando a triplicar, em $120Hz$.

4.3 MÓDULO DE CISALHAMENTO

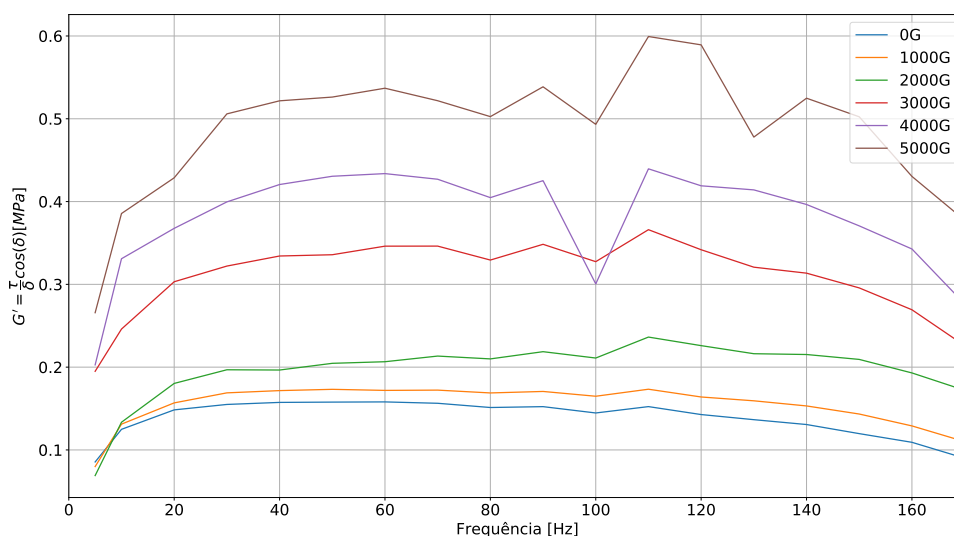
A partir dos resultados da rigidez, combinando-os com a fase, foi possível se obter então os módulos de cisalhamento, mostrados nas **Figuras de 43 a 48**.

Figura 43 – Gráfico com os valores obtidos para G^* , para o sistema sem aplicação de campo magnético durante seu processo de cura, para cada uma das frequências ensaiadas.



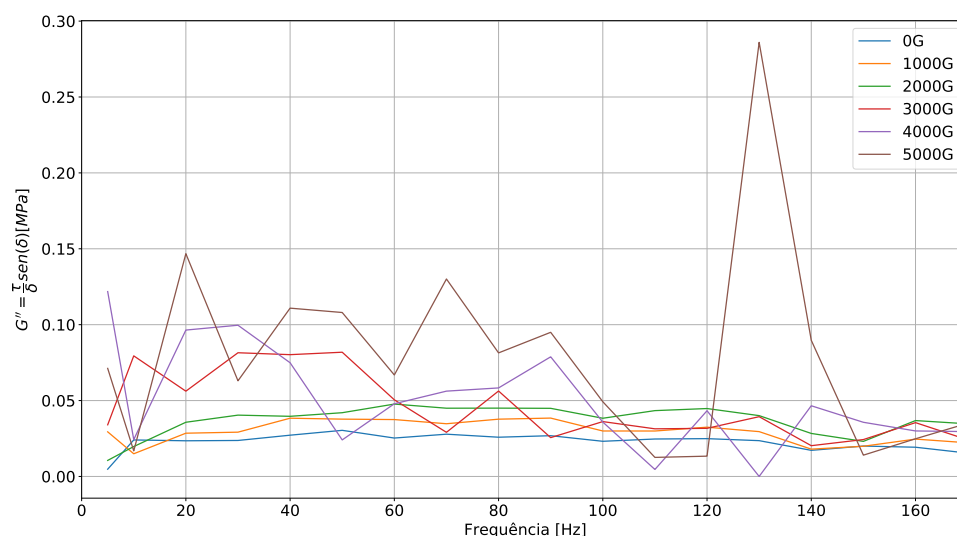
Fonte – Próprio Autor.

Figura 44 – Gráfico com os valores obtidos para G' , para o sistema sem aplicação de campo magnético durante seu processo de cura, para cada uma das frequências ensaiadas.



Fonte – Próprio Autor.

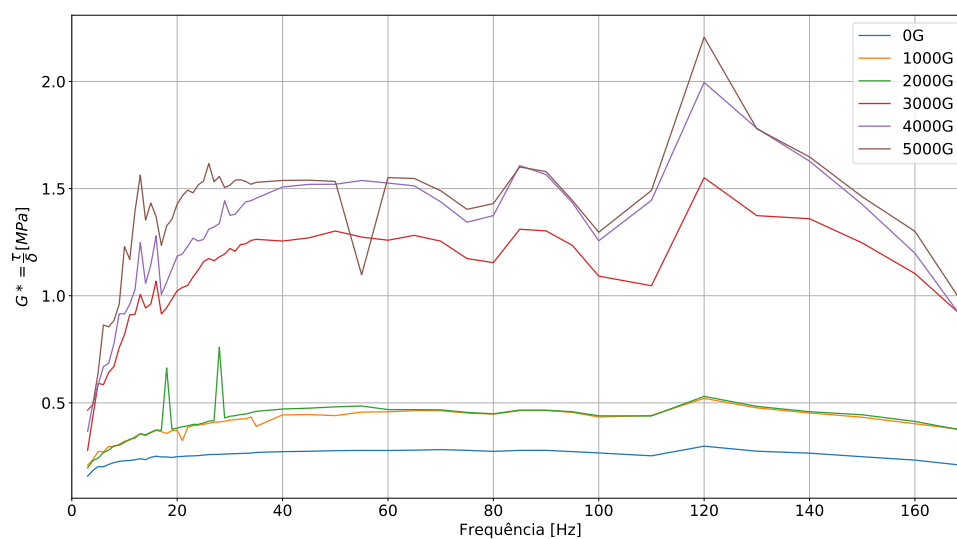
Figura 45 – Gráfico com os valores obtidos para G'' , para o sistema sem aplicação de campo magnético durante seu processo de cura, para cada uma das frequências ensaiadas.



Fonte – Próprio Autor.

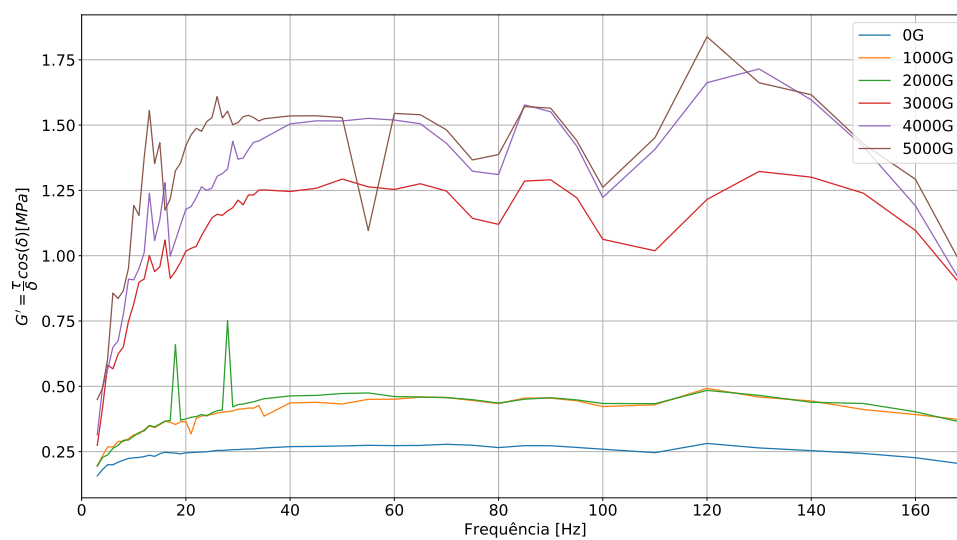
Das **Figuras 43 a 45**, pode-se entender melhor como se deu a mudança de fase. O motivo dela alterar a forma como se comporta em diferentes frequências se dá pela forma como o módulo de perdas se comportou, em geral, aumentando com aplicação de campo, porém sendo mais sensível em faixa específica, como entre 100 e 120 Hz, mesmo sendo uma mistura homogênea durante a cura, as propriedades mecânicas resultantes são anisotrópicas.

Figura 46 – Gráfico com os valores obtidos para G^* , para o sistema com aplicação de campo magnético durante seu processo de cura, para cada uma das frequências ensaiadas.



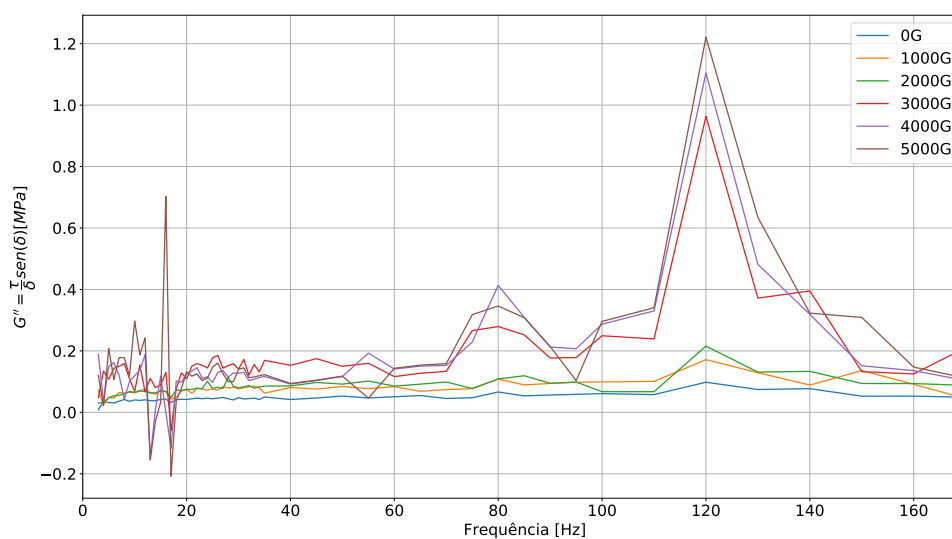
Fonte – Próprio Autor.

Figura 47 – Gráfico com os valores obtidos para G' , para o sistema com aplicação de campo magnético durante seu processo de cura, para cada uma das frequências ensaiadas.



Fonte – Próprio Autor.

Figura 48 – Gráfico com os valores obtidos para G'' , para o sistema com aplicação de campo magnético durante seu processo de cura, para cada uma das frequências ensaiadas.

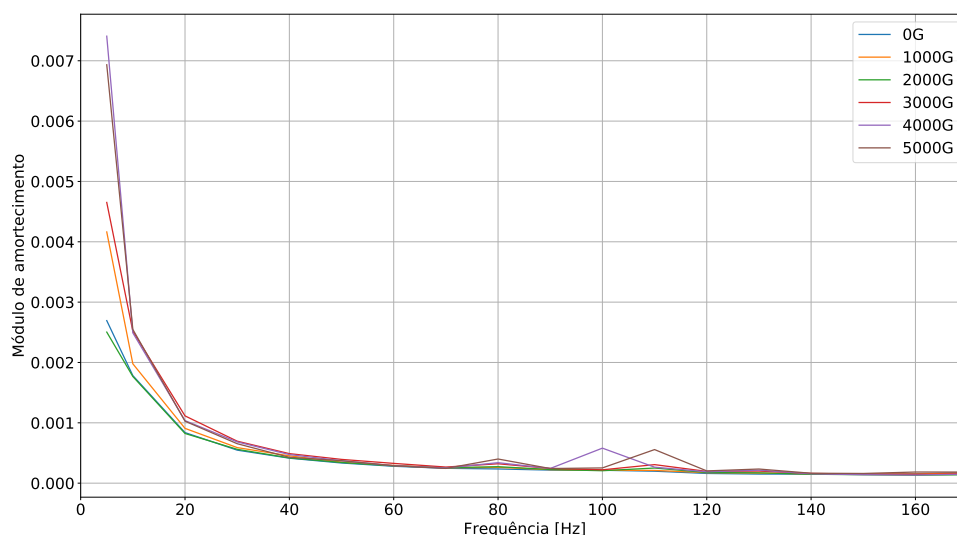


Fonte – Próprio Autor.

Tal conclusão é também pertinente as **Figuras 46 a 48**, com a ressalva de que a faixa de ressonância neste caso seria um pouco após, entre 110 e 130 Hz, tal alteração sendo consequência do aumento do módulo de rigidez e de perdas devido à presença do campo magnético durante a cura do elastômero, uma vez que a frequência natural de um sistema é consequência, também, da rigidez do mesmo.

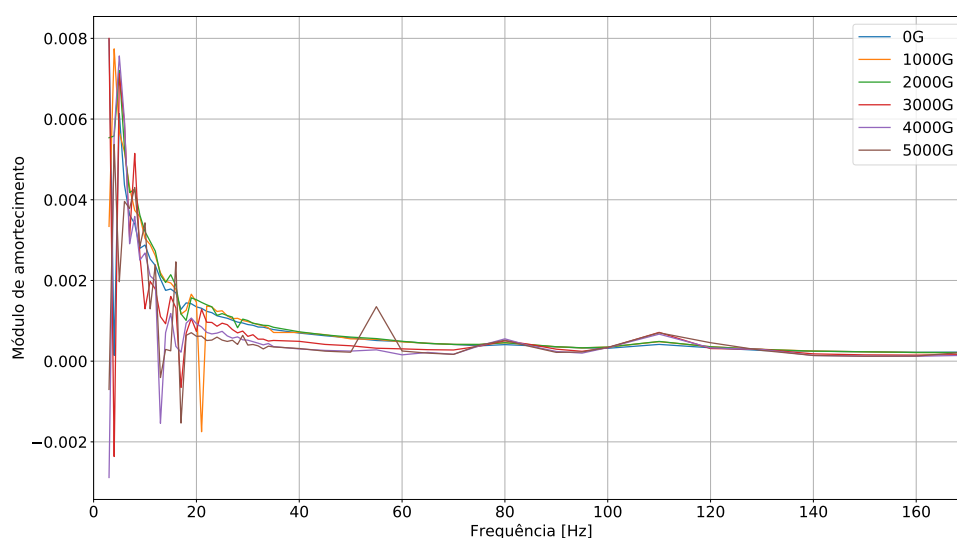
4.4 AMORTECIMENTO

Figura 49 – Gráfico com os valores obtidos para η , para o sistema sem aplicação de campo magnético durante seu processo de cura, para cada uma das frequências ensaiadas.



Fonte – Próprio Autor.

Figura 50 – Gráfico com os valores obtidos para η , para o sistema com aplicação de campo magnético durante seu processo de cura, para cada uma das frequências ensaiadas.



Fonte – Próprio Autor.

As **Figuras 49 e 50**, são importantes para identificar o efeito sobre o amortecimento da aplicação de campo magnético, condizendo com o aumento do módulo G'' pela aplicação do campo durante a cura. Percebe-se que os intervalos nos quais G''

apresentou a ressonância, coincidiram com os intervalos com picos locais de amortecimento.

5 CONCLUSÕES

Embora a construção de duas amostras idênticas seja praticamente impossível quando tratamos do MRE, os resultados sugerem que a aplicação de um campo magnético durante o processo de cura têm alguns efeitos que merecem destaque:

- Aumento da rigidez do material com aplicação do campo durante a cura, mesmo sem posterior aplicação durante seu uso;
- Diminuição dos ângulos de fase, tornando a resposta do material mais elástica;
- Maior aumento no módulo de cisalhamento proveniente da aplicação de campo magnético, sendo mais sensível a variações do mesmo, com uma ganho, de até 50% quando comparado com seu semelhante que não possuía campo durante o processo de cura;
- Possibilidade de implementação de um sistema de controle que permita o sistema assumir valores de rigidez e/ou módulos de cisalhamento mais amplos que sua contra parte sem aplicação de campo, permitindo uma variedade de aplicações, ou ainda, permitindo-se dimensioná-lo com menos material, reduzindo assim, o custo de implementação.

5.1 TRABALHOS FUTUROS

São possíveis continuações deste trabalho:

- Investigar a não-linearidade surgida da aplicação de campo magnético;
- Estudar mais profundamente a correlação entre o campo aplicado durante a cura e a variação das propriedades mecânicas;
- Desenvolver sistema de controle baseado na alteração de campo magnético para controle de vibrações.

REFERÊNCIAS

BISHOP, R. **Vibration**. New York: Cambridge University Press, 1979. ISBN 0521296390.

CALLISTER, W. **Materials science and engineering: an introduction**. Hoboken: John Wiley & Sons, 2010. ISBN 9780470419977.

CARLSON, J.; JOLLY, M. R. MR fluid, foam and elastomer devices. **Mechatronics**, Cary, v. 10, n. 4-5, p. 555–569, jun. 2000. DOI: 10.1016/s0957-4158(99) 00064-1. [https://doi.org/10.1016/s0957-4158\(99\)00064-1](https://doi.org/10.1016/s0957-4158(99)00064-1).

CARVALHO, H. E. L. de. **Caracterização de um material magneto reológico para amortecimento de vibrações em estruturas**. 2020. 74 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista "Julio de Mesquita Filho", Ilha Solteira. 2020.

ÇENGEL, Y.; CIMBALA, J. **Mecânica dos fluidos**. 3. ed. [S.l.]: AMGH Editora, 2015. ISBN 9788580554915. <https://books.google.com.br/books?id=aP30BgAAQBAJ>.

CHRISTENSEN, R. **Theory of Viscoelasticity: an introduction**. [S.l.]: Elsevier Science, 2012. ISBN 9780323161824. <https://books.google.com.br/books?id=-k2-WE7QIkYC>.

DAVIS, L. C. Model of magnetorheological elastomers. **Journal of Applied Physics**, Dearborn, v. 85, n. 6, p. 3348–3351, mar. 1999. DOI: 10.1063/1.369682. <https://doi.org/10.1063/1.369682>.

DEN HARTOG, J. P. **Mechanical vibrations (Dover Civil and Mechanical Engineering)**. [S.l.]: Dover Publications, jan. 1985. ISBN 0486647854. <https://www.xarg.org/ref/a/0486647854/>.

DEN HARTOG, J. P.; ORMONDROYD, J. Theory of the dynamic vibration absorber. **Transactions Of The American Society Of Mechanical Engineers**. New York, v. 50 p. 9-22. 1928.

ESPÍNDOLA, J. J.; BAVASTRI, C. A. Viscoelastic neutralisers in vibration abatement: a non-linear optimization approach. **Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences**, Rio de Janeiro, v. 19, n. 3, p. 154-163, 1997.

FRAHM, H. **Device for damping vibrations of bodies**. Titular: United States Patent Office. US n. 989958. Depósito: 30 out. 1909. Concessão: 18 abr. 1911.

FUKUSHIMA, J. C. **Desenvolvimento e caracterização de um Elastômero Magneto-Reológico para aplicação em absorvedores de vibração mecânica**. 2016. 80 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista "Julio de Mesquita Filho", Ilha Solteira. 2016.

FUKUSHIMA, J. C. **Caracterização dinâmica de elastômeros magneto-reológicos**. 2021. 100 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista "Julio de Mesquita Filho", Ilha Solteira. 2021.

HARRIS, C.; CREDE, C. **Shock and vibration handbook**. [S.l.]: McGraw-Hill, 1976. (McGraw-Hill handbooks). ISBN 9780070267992. <https://books.google.com.br/books?id=npNRAAAAMAAJ>.

HUNT, J. **Dynamic vibration absorbers**. [S.l.]: Mechanical Engineering Publications, 1979. ISBN 9780852984178. <https://books.google.com.br/books?id=2m6wAAAAIAAJ>.

KARNOPP, D. Active and semi-active vibration isolation. **Journal of Vibration and Acoustics**, Davis, v. 117, B, p. 177–185, jun. 1995. ISSN 1048-9002. DOI: 10.1115/1.2838660. <https://doi.org/10.1115/1.2838660>.

KIM, Y.-K. *et al.* Note: Real time control of a tunable vibration absorber based on magnetorheological elastomer for suppressing tonal vibrations. **Review of Scientific Instruments**, Mellville, v. 83, n. 4, p. 046108, 2012. DOI: 10.1063/1.4704455. <https://doi.org/10.1063/1.4704455>.

LI, W. H.; ZHOU, Y.; TIAN, T. F. Viscoelastic properties of MR elastomers under harmonic loading. **Rheologica Acta**, Wollongong, v. 49, n. 7, p. 733–740, mar. 2010. DOI:10.1007/s00397-010-0446-9. <https://doi.org/10.1007/s00397-010-0446-9>.

LIAO, G. *et al.* Magnetic-field-induced normal force of magnetorheological elastomer under compression status. **Industrial & Engineering Chemistry Research**, Hefei, v. 51, n. 8, p. 3322–3328, fev. 2012. DOI: 10.1021/ie201976e. <https://doi.org/10.1021/ie201976e>.

MACHADO, L. P. **Caracterização de elastômero magneto-reológico por modelo de Kelvin-Voigt**. 2019. 39 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista "Julio de Mesquita Filho", Ilha Solteira. 2019.

MEIROVITCH, L. **Fundamentals of vibrations**. Boston: McGraw-Hill, 2001. ISBN 0071181741.

MEZGER, T. **The Rheology Handbook**: 4th Edition. Hannover: Vincentz Network, 2014. ISBN 978-3-86630-650-9.

ROENÇA, M. **Aplicação do modelo constitutivo viscoelástico de Kelvin-Voigt e do método dos elementos finitos para a determinação da influência das propriedades do solo na detecção de vazamentos de água em redes de distribuição subterrâneas**. 2019. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista "Julio de Mesquita Filho", Ilha Solteira. 2019.

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

RAO, S. **Mechanical vibrations**. Harlow: Pearson, 2018. p. 1291. ISBN 1-292-17860-4.

SNOWDON, J. **Vibration and shock in damped mechanical systems**. [S.l.]: J. Wiley, 1968. <https://books.google.com.br/books?id=FYpRAAAAMAAJ>.

STUTZ, L. T. **Síntese e análise de uma suspensão semi-ativa magneto-reológica baseada na abordagem de controle com estrutura**. 2005. Doutorado (Ciências em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro. 2005.

VARGA, Z.; FILIPCSEI, G.; ZRÍNYI, M. Magnetic field sensitive functional elastomers with tuneable elastic modulus. **Polymer**, Budapest, v. 47, n. 1, p. 227–233, jan. 2006. DOI: 10.1016/j.polymer.2005.10.139. <https://doi.org/10.1016/j.polymer.2005.10.139>.

WU, J. *et al.* Anisotropic polyurethane magnetorheological elastomer prepared through in situ polycondensation under a magnetic field. **Smart Materials and Structures**, Chengdu, v. 19, n. 10, p. 105007, ago. 2010. DOI: 10.1088/0964-1726/19/10/105007.

ZAJĄC, P. *et al.* Isotropic magnetorheological elastomers with thermoplastic matrices: structure, damping properties and testing. **Smart Materials and Structures**, Philadelphia, v. 19, n. 4, p. 045014, mar. 2010. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/0964-1726/19/4/045014>

ZHANG, W.; GONG, X.; CHEN, L. A Gaussian distribution model of anisotropic magnetorheological elastomers. **Journal of Magnetism and Magnetic Materials**, Hefei v. 322, n. 23, p. 3797–3801, out. 2010. DOI: 10.1016/j.jmmm.2010.08.004. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2010.08.004>.