

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

FERNANDA CAROLINA DE ALMEIDA

**ISOLAMENTO DE VIBRAÇÕES EM ESTRUTURAS DE PONTES UTILIZANDO
ELASTÔMERO MAGNETO-REOLÓGICO**

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

FERNANDA CAROLINA DE ALMEIDA

**ISOLAMENTO DE VIBRAÇÕES EM ESTRUTURAS DE PONTES UTILIZANDO
ELASTÔMERO MAGNETO REOLÓGICO**

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira – UNESP como parte dos requisitos para obtenção do título de mestre em Engenharia Mecânica.

Prof. Dr. Amarildo Tabone Paschoalini
Orientador

FICHA CATALOGRÁFICA
Desenvolvido pelo Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação

A447i Almeida, Fernanda Carolina de.
Isolamento do vibrações em estruturas de pontes utilizando elastômero magneto-reológico / Fernanda Carolina de Almeida. -- Ilha Solteira: [s.n.], 2021
65 f. : il.

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

Orientador: Amarildo Tabone Paschoalini
Inclui bibliografia

1. Elastômero magneto-reológico. 2. Isolamento de vibrações. 3. Estruturas inteligentes.

Rafine da Silva Santos
Rafine da Silva Santos

Supervisora Técnica de Seção
Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação
Biblioteca Técnica de Biblioteca e Documentação
CIBD-2021

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: Isolamento de vibrações em estruturas de pontes utilizando Elastômero Magneto-Reológico

AUTORA: FERNANDA CAROLINA DE ALMEIDA

ORIENTADOR: AMARILDO TABONE PASCHOALINI

Aprovada como parte das exigências para obtenção do Título de Mestra 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. GILBERTO PECHOTO DE MELO (Participação Virtual)
Departamento de Engenharia Mecânica / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira - UNESP

Prof. Dr. JOÃO VICENTE ZAMPIERON (Participação Virtual)
Departamento de Engenharia Civil / Universidade do Estado de Minas Gerais - UEMG

Ilha Solteira, 22 de fevereiro de 2021

DEDICATÓRIA

À Maria Helena, Nelson e Fábio Miguel.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, que me permitiu chegar até aqui.

À minha família que sempre me apoiou e incentivou durante este período.

Aos professores do PPGEM pelo ensino que foi fundamental para este trabalho, em especial ao meu orientador Prof. Dr. Amarildo Tabone Paschoalini por todo o conhecimento transmitido, pela paciência e pela disponibilidade em sempre me auxiliar.

Aos todos os meus colegas do laboratório e do grupo de pesquisa, pela convivência e amizade.

Ao meu amigo Luis Paulo Moraes Lima que, mesmo longe, não mediu esforços para me ajudar e contribuir com a realização deste trabalho.

Ao meu colega de pesquisa Jefferson Fukushima, por ceder os dados necessários para complemento da pesquisa

*“A maior recompensa para o trabalho do
homem não é o que ele ganha com isso,
mas o que ele se torna com isso.”*

John Ruskin

RESUMO

Nos últimos anos, a implementação de sistemas de amortecimento em estruturas civis vem ganhando uma atenção considerável, com particular ênfase em projetos de obras especiais. Por esta razão, sistemas compostos por materiais inteligentes vêm sendo desenvolvidos a fim de otimizar o comportamento das estruturas de pontes sob carregamentos dinâmicos. Devido à simplicidade mecânica e capacidade de propriedades controláveis, os elastômeros Magneto-Reológicos (MRE) se destacam por fornecerem uma alternativa interessante para isolamento de vibrações. Neste trabalho avalia-se numericamente a eficiência de um sistema de amortecimento utilizando MRE aplicado a um modelo de uma ponte em viga submetida a sismos. Sob um campo magnético variável, foi possível modificar os padrões de rigidez e amortecimento do sistema alterando a frequência natural da estrutura. Dessa forma, se torna possível amenizar as amplitudes de vibração numa faixa de frequência crítica tornando a passagem pela ressonância menos danosa.

Palavras-chave: Elastômero Magneto-Reológico. Isolamento de vibrações. Estruturas inteligentes.

ABSTRACT

In the last years, the implementation of intelligent systems in civil structures has been gaining considerable attention, with emphasis on bridge designs. For this reason, systems composed of intelligent materials have been developed in order to optimize the behavior of bridge structures under dynamic loading. Due to their mechanical simplicity and controllable properties, magnetorheological elastomers (MRE) stand out for providing an interesting alternative for vibration isolation. In this study, the efficiency of a damping system is numerically evaluated using MRE applied to a beam bridge model subjected to earthquakes. Under a variable magnetic field, it was possible to modify the system's stiffness and damping patterns by changing the natural frequency of the structure. Thus, it becomes possible to soften vibration amplitudes in a critical frequency range, making a passage through the resonance less harmful.

Keywords: Magnetorheological elastomers. Vibration isolation. Intelligent structures.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Tipologia de ponte	16
Figura 2 – Ponte suspensa e ponte estaiada	17
Figura 3 – Estrutura de uma ponte em viga	19
Figura 4 – Tipos de movimentos entre placas tectônicas	23
Figura 5 – Distribuição das placas tectônicas	24
Figura 6 – Sistema mecânico da ponte	26
Figura 7 – Representação do comportamento das partículas magnéticas	30
Figura 8 – Representação da estrutura das partículas magnéticas no MRE	31
Figura 9 – Projeto de ponte em viga – visão geral	33
Figura 10 – Seção transversal da ponte com aparelho de apoio	34
Figura 11 – Espectro de resposta do terremoto El Centro	35
Figura 12 – Modelo do sistema mecânico da ponte	37
Figura 13 – Comportamento de um sólido viscoelástico	38
Figura 14 – Esquema do aparato experimental	41
Figura 15 – Detalhamento do corpo de prova	41
Figura 16 – Deformação devido ao cisalhamento	42
Figura 17 – diagrama de corpo livre do sistema	43
Figura 18 – Gráfico tensão/deformação do MRE.....	47
Figura 19 – Módulo de cisalhamento x Frequência x Campo magnético	48
Figura 20 – Viscosidade x Frequência x Campo magnético	48
Figura 21 – Espectro de resposta de projeto	50
Figura 22 – Amplitude do deslocamento – Norma	51
Figura 23 – Fase – Norma	51

Figura 24 – Aceleração do terremoto no domínio do tempo – Peru	52
Figura 25 – Amplitude de deslocamento – Peru	53
Figura 26 – Fase – Peru	53

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Classificação dos aparelhos de apoio	21
Tabela 2 – Propriedades do MRE.....	41
Tabela 3 – Frequências naturais e amortecimento	50
Tabela 4 – Razão do valor médio quadrático (RMS) da amplitude da resposta da estrutura em relação ao caso de fluxo de campo OT	55

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

AA	Aparelho de apoio
ASCE	<i>American society of civil engineers</i>
DAF	Fator de amplificação dinâmica (<i>Dynamic amplification factor</i>)
DNER	Departamento Nacional de Estrada de Rodagem
ER	Eletroreológico
GDL	Grau de liberdade
MR	Magnetoreológico
MRE	Elastômero Magneto-Reológico (<i>Magnetorheological Elastomer</i>)
NBR	Norma técnica brasileira
PEER	<i>Pacific Earthquake Engineering Research Center</i>
RMS	Valor quadrático médio (<i>Root mean square</i>)
SMA	Liga com memória de forma (<i>shape-memory alloy</i>)

LISTA DE SÍMBOLOS

τ	Tensão de cisalhamento
γ	Deformação
η	Módulo de amortecimento
G	Módulo de cisalhamento
F_e	Ferro
x	Deslocamento
h	Altura
f	Força
A	Área
k	Rigidez
m	Massa
c	Amortecimento
t	Tempo
ω	Frequência
ω_n	Frequência natural
$\mathcal{F}$	Transformada de Fourier
ζ	Fator de amortecimento
$[T]$	Matriz de transferência
T	Tesla

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	19
2	REVISÃO DE LITERATURA.....	21
2.1	TIPOLOGIA DE PONTES E SISTEMAS ESTRUTURAIS MAIS COMUNS.....	21
2.1.1	Pontes de cabos	22
2.1.2	Pontes em arco	24
2.1.3	Pontes em viga.....	24
2.2	APARELHOS DE APOIO	25
2.3	ANÁLISE ESTRUTURAL.....	26
2.4	AÇÕES SÍSMICAS.....	28
2.5	AMORTECIMENTO DE VIBRAÇÕES MECÂNICAS.....	31
2.5.1	Sistema de amortecimento passivo.....	33
2.5.2	Sistema de amortecimento ativo	33
2.5.3	Sistema de amortecimento semiativo	34
2.6	ELASTÔMERO MAGNETO-REOLÓGICO (MRE).....	34
2.6.1	Elastômero magneto-reológico isotrópico.....	36
2.6.2	Elastômero magneto-reológico anisotrópico	37
3	METODOLOGIA.....	39
3.1	DIMENSIONAMENTO DA PONTE	39
3.1.1	Inserção do aparelho do apoio.....	40
3.2	SINAL DE UM TERREMOTO	41
3.3	MODELAGEM DO SISTEMA.....	42
3.4	MODELAGEM DO ELASTÔMERO MAGNETO REOLÓGICO (MRE)	43
3.5	FABRICAÇÃO DO ELASTÔMERO MAGNETO REOLÓGICO (MRE)	45
3.6	EQUACIONAMENTO DO PROBLEMA.....	49
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	52
4.1.	CARACTERIZAÇÃO DO MRE	52
4.2.	FREQUÊNCIA NATURAL E FATOR DE AMORTECIMENTO.....	55
4.3.	SIMULAÇÕES.....	56
4.3.1.	Espectro de resposta de projeto.....	56
4.3.2.	Espectro de resposta de um terremoto real	58

4.4.	QUANTIFICANDO A MUDANÇA DA RESPOSTA DO SISTEMA.....	59
5	CONCLUSÃO	62
6	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	63
	REFERÊNCIAS	64

1 INTRODUÇÃO

As técnicas de isolamento de vibrações vêm se tornando gradualmente um método estabelecido para proteger estruturas civis de excitações externas uma vez que estas estruturas desempenham um papel importante em várias áreas da engenharia, onde têm a função principal de suportar elementos. A eficiência estrutural é a preocupação primária de um projeto. Em seu dimensionamento, normalmente são determinados os esforços internos e os deslocamentos que ocorrem supondo que a estrutura esteja submetida a um carregamento arbitrário invariante no tempo. Uma forma de conseguir esta determinação é analisar a estrutura de forma simplificada que consiste em transformá-la em um sistema com n graus de liberdade (GDL) para obter as equações de movimento, possibilitando a previsão de comportamento, além de avaliar alguns critérios como frequência natural, rigidez e amortecimento.

Uma das características comuns das estruturas civis é que o amortecimento estrutural inerente que reduz as vibrações é muito pequeno, normalmente dimensionado apenas majorando as cargas estáticas. Amezcuita-Sanchez *et al.* (2013) confirma que estas estruturas têm baixa capacidade de dissipar energia, sendo incapazes de se adaptar à dinâmica de um ambiente em constante modificação. Como resultado, os distúrbios aplicados a essas estruturas podem induzir vibrações estruturais duradouras e às vezes severas (LUU *et al.*, 2014).

No entanto, pesquisas desenvolvidas acerca das amplificações dinâmicas que ocorrem sobre estruturas, vêm ganhando uma atenção considerável. Em regiões onde atividades sísmicas ocorrem regularmente, o dimensionamento de estruturas já obedece a alguns critérios que vão além da verificação de condições de resistência habitual. O conceito de implementar sistemas inteligentes em estruturas civis vem se tornando um ponto de interesse, com particular ênfase em projetos de tabuleiros de pontes, mediante a abalos sísmicos.

Tais conceitos aplicados em estruturas civis são descritos por Song, Ma e Li (2006) como sistemas que podem ajustar automaticamente características estruturais em resposta a perturbações externas e/ou cargas inesperadas. Essas

características afetam de forma positiva a eficiência estrutural. Além de permanecer eficiente em toda sua vida útil, a implementação destes sistemas tem como objetivo evitar características de performance que desviem de sua função ou somem ao custo de manutenção. Um projeto estrutural eficiente contribui também com a funcionalidade da estrutura através do aumento de sua vida útil e evita perturbação como o aparecimento de patologias e interrupções no tráfego devido a manutenção e até mesmo ruína.

Por esta razão, sistemas compostos por materiais inteligentes vêm sendo desenvolvidos, a fim de otimizar o isolamento de vibrações. Entre estes materiais, destaca-se o Elastômero Magneto-Reológico (MRE – *Magnetorheological Elastomer*) que é definido por Jolly *et al.* (1996) como sendo materiais inteligentes, cujas propriedades reológicas podem ser controladas por um campo magnético externo aplicado. Devido às suas propriedades únicas, os MREs têm sido usados recentemente em uma grande variedade de aplicações, tais como absorvedores de vibração adaptados, amortecedores, sensores, entre outros (TIAN; NAKANO, 2017).

O objetivo deste trabalho é estudar o desempenho do Elastômero Magneto-Reológico ao isolar vibrações em tabuleiros de pontes em viga através de uma modelagem numérica comparado com um modelo experimental. Assim como analisar o comportamento dinâmico de uma ponte em viga quando submetida a excitações em diferentes frequências, simulando terremotos.

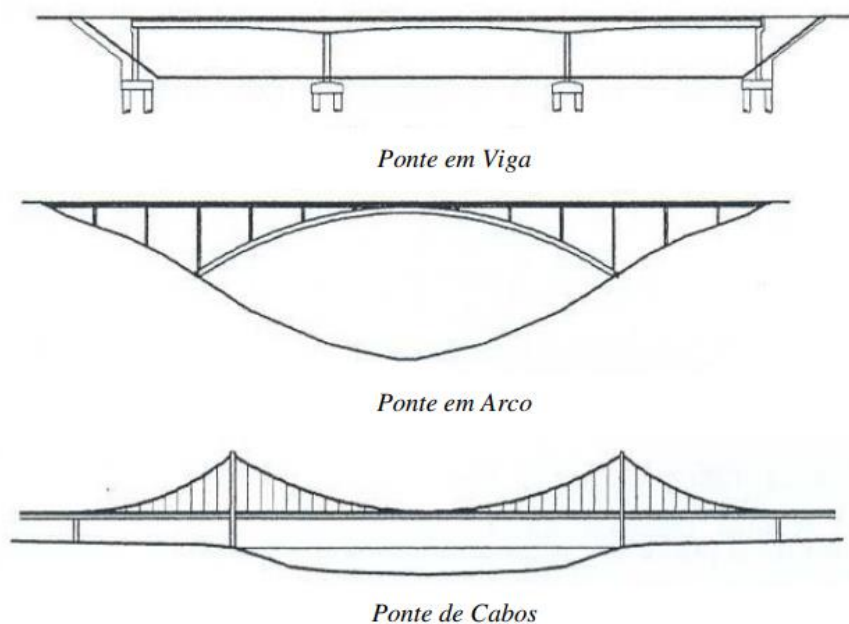
2 REVISÃO DE LITERATURA

Neste capítulo será apresentado uma revisão da literatura abordando alguns aspectos relevantes para o estudo de isolamento de vibrações, análise estrutural e sistemas de amortecedores. Quanto à organização deste capítulo, primeiramente é apresentado uma explanação de conceitos estruturais ligados à engenharia civil. A seguir, alguns tipos de amortecimento e por fim são abordados os aspectos do Elastômero Magneto-Reológico e sua aplicação como amortecedor de um sistema.

2.1 TIPOLOGIA DE PONTES E SISTEMAS ESTRUTURAIS MAIS COMUNS

Os diferentes tipos de sistemas estruturais que pode ser observado no patrimônio de obras especiais são motivados por diferentes fatores como materiais, tecnologias, estética, condições topográficas e econômicas. Define-se como ponte uma obra construída com o intuito de conectar pontos separados por um curso de água. Sua classificação se deve pelo uso para qual foram projetadas, podendo ser classificadas em pontes rodoviárias, ferroviárias e pedonais ou passarelas. Segundo Costa (2009), a escolha da tipologia é sempre condicionada pelo seu comportamento estrutural. Para determinadas pontes, onde o impacto visual no ambiente é importante, a estética também pode assumir um papel de grande destaque, justificando inclusive, em determinados casos um aumento do custo da obra. Dentre a variedade de sistemas estruturais, pode-se destacar 3 grandes tipos: pontes em viga, pontes em arco e pontes de cabos, apresentados na Figura 1.

Figura 1 - Tipologia de ponte



Fonte: Manterola e Cruz (2004), adaptado por Costa (2009)

2.1.1 Pontes de cabos

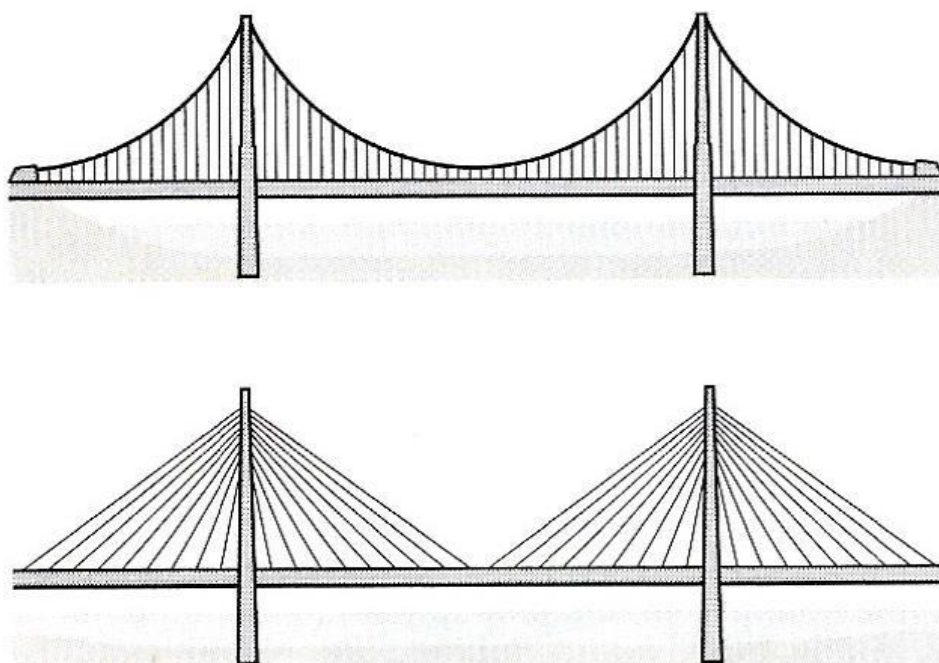
Para as pontes de cabos, Pelke e Kurrer (2012) definem que o sistema estrutural e a distribuição transversal das cargas neste tipo de estrutura são sustentados por um sistema contínuo, rígido ou rotacionalmente rígido de cabos tensionados. Estes cabos servem como sustentação para os tabuleiros, possibilitando maiores vãos entre os pilares. Estas se subdividem em duas categorias: ponte suspensa e ponte estaiada.

As pontes suspensas, também chamadas de ponte pênsil, possuem cabos ancorados no solo, que se estendem por todo o comprimento da ponte e que são presos aos pilares. O tabuleiro é conectado aos principais cabos que são suspensos por cordas ou varas verticais (Figura 2a). Dessa forma, o peso do tabuleiro tensiona os cabos e este esforço é transferido em forma de compressão vertical para os pilares. Pelke e Kurrer (2012) relata que a tensão nas extremidades dos cabos é equilibrada pelo esforço de ancoragem do solo. Dentro desta categoria

podemos destacar a *Golden Gate Bridge*, localizada na cidade de *San Francisco*, nos Estados Unidos.

As pontes estaiadas, por sua vez não possuem ancoragens e os cabos não se estendem por todo o comprimento. Neste sistema estrutural os cabos saem dos mastros e são ancorados de forma simétrica no próprio tabuleiro, fazendo com que o mesmo sofra esforços tanto verticais quanto horizontais, como apresentada na Figura 2b. Um exemplo conhecido de ponte estaiada no Brasil é a ponte Octávio Frias de Oliveira, localizada na cidade de São Paulo.

Figura 2 - Ponte suspensa (a) e ponte estaiada (b)



Fonte: Nordrum (2015)¹

¹ NORDRUM, Amy. The Rise of the Cable-Stayed Bridge. Scientific American, [S.L.], v. 312, n. 2, p. 15-19, 20 jan. 2015. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1038/scientificamerican0215-15>

2.1.2 Pontes em arco

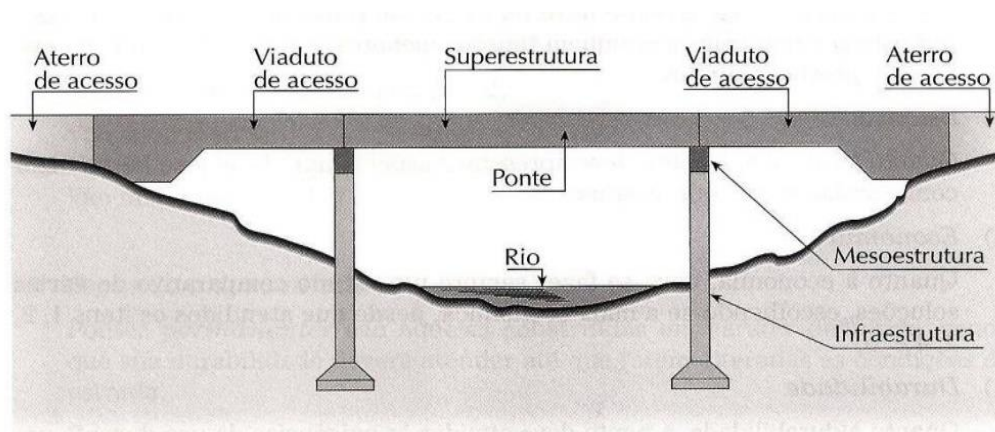
As pontes em arco, sendo um dos sistemas construtivos mais antigos da engenharia, apresentam um sistema estrutural onde os esforços de flexão podem ser reduzidos em função de sua forma, resultando na compressão dos elementos estruturais. Neste sistema, os arcos suportam as ações aplicadas na estrutura e transmite para as fundações através de seus encontros. Em uma situação ideal o fluxo dos esforços e a forma do arco são precisamente coincidentes. Esta tipologia caiu em desuso, porém ainda é possível ver este esquema estrutural combinado com outros tipos.

2.1.3 Pontes em viga

Este tipo de ponte é o mais simples e com menor custo, conseqüentemente é tipo mais comum e mais utilizado atualmente. Do ponto de vista estrutural este sistema construtivo é basicamente uma estrutura rígida suportada por dois ou mais apoios, fazendo com que a parte superior da ponte, denominada tabuleiro, seja solicitado por compressão nas fibras superiores e tração nas fibras inferiores.

Nas pontes em viga, detalhada na Figura 3, os tabuleiros são apoiados em vigas horizontais, também chamadas de longarinas. Este sistema é denominado superestrutura. A superestrutura é suportada em ambas as suas extremidades por pilares (mesoestrutura) que possui a função de transmitir as cargas da superestrutura para o solo por meio da fundação (infraestrutura). Marchetti (2008) afirma que uma das principais características de ponte em viga é que suas vinculações não transmitem momentos fletores da superestrutura para a infraestrutura.

Figura 3 - Estrutura de uma ponte em viga



Fonte: Marchetti (2008)

2.2 APARELHOS DE APOIO

Os aparelhos de apoio (AA) são dispositivos fundamentais em estruturas de pontes e viadutos. Ele é o responsável pela vinculação entre os elementos como vigas e pilares e tem como objetivo principal suportar a movimentação da estrutura e assegurar a transmissão de carga entre os elementos principais. Os principais tipos estão subdivididos em categorias apresentadas na Tabela 1.

Dentre a grande variedade de AA, encontram-se os aparelhos de apoio elastoméricos. Esta categoria se enquadra no tipo AA deslizante ou linear e, segundo Marchetti (2008), são considerados os mais simples, porém devido à sua componente elástica permite movimentos de rotação em todas as direções. O material mais utilizado para este tipo de aparelho de apoio é o polímero cloropreno, sendo comumente empregado em diversas obras de pontes.

Tabela 1 - Classificação dos aparelhos de apoio

Tipo	MOVIMENTAÇÃO	FUNCIONAMENTO
Rolos ou roletes	Os movimentos admitidos são apenas de translação	Consistem em um ou mais rolos entre placas de aço superior e inferior paralelas com engrenagens ou outra forma de guia para garantir que o eixo do rolo seja mantido na orientação desejada.
Pêndulo ou oscilantes	Têm como função evitar movimentos horizontais e são aplicáveis para as condições em que apenas é permitido o movimento longitudinal e onde o movimento transversal deve ser prevenido	Consistem essencialmente numa superfície curva em contacto com uma superfície plana ou curva. São normalmente utilizados para complementar os AA de rolos.
Articulações metálicas	Permitem o movimento de rotação, enquanto ao mesmo tempo impedem o movimento longitudinal	Um pino central é o responsável pela transferência das forças por meio de rotação de uma placa de base superior que está ligada à superestrutura, para uma placa de base inferior que está ligado à mesoestrutura.
Deslizantes	Permitem movimentos transversais, longitudinais e rotação	São constituídos por duas placas que deslizam entre si por meio de uma superfície que permite eliminar a resistência ao atrito. Normalmente esta superfície é constituída por materiais diferentes do das próprias placas para facilitar o deslizamento.
Esféricos ou cilíndricos	Permitem movimentos tridimensionais	São constituídos por uma chapa côncava e uma chapa convexa, e são instalados sobre superfícies de deslizamento planas
Lineares	<u>Guiados</u> : Só permitem deslocamentos numa direção, restringido o movimento perpendicular. <u>Bloqueados</u> : restringem todos os movimentos horizontais, mas permitem rotações nesse plano	São constituídos por superfícies planas, onde sobre a superfície inferior existe uma placa de politetrafluoretileno (PTFE) que permite o deslizamento da placa superior, assegurando assim movimentos de translação

Fonte: próprio autor (2021).

2.3 ANÁLISE ESTRUTURAL

A análise estrutural prioriza dois aspectos essenciais nos projetos e dimensionamento de estruturas: a segurança e o comportamento da estrutura sob carregamento. Nos projetos de pontes, assim como nas demais obras civis, a estrutura deve satisfazer as condições de uso para as quais foram projetadas e

executadas. Assim, deve-se adaptar as condições de escoamento satisfatório prevendo futuras situações em que a estrutura pode ser submetida.

Segundo a NBR 8681/2004 – Ações e Segurança nas Estruturas, as ações podem ser classificadas em ações permanentes, variáveis e excepcionais. Considerando a NBR 7187/2003 – Projeto de Pontes de Concreto Armado e de Concreto Protendido – Procedimento, as ações nas pontes são definidas como as causas que provocam o aparecimento de esforços ou deformações nas estruturas. Dentre as ações sofridas pelas estruturas de pontes, destaca-se as ações variáveis e excepcionais, estabelecida na NBR 7187/2003 como ações de caráter transitório que compreendem, entre outros, os efeitos dinâmicos.

O efeito dinâmico das cargas móveis deve ser analisado pela teoria da dinâmica das estruturas. É permitido, no entanto, assimilar as cargas móveis a cargas estáticas, através de sua multiplicação pelos coeficientes de impacto (NBR7187 - ABNT, 2003). Estes coeficientes, também denominado fator de amplificação dinâmica – DAF (*Dynamic Amplification Factor*) pode ser determinado majorando as cargas estáticas em relação ao comprimento do vão teórico do elemento. Ataei e Miri (2018), acrescenta que apesar da maioria dos códigos de projeto considerar o comprimento de extensão como o parâmetro principal para determinar o DAF, alguns levam em consideração a primeira frequência natural, que é a mais importante. No entanto, ainda segundo os autores, a avaliação deste parâmetro é bastante complicada devido a uma infinidade de fatores que o afetam.

Amezquita-sanchez *et al.* (2013) relata que no dimensionamento baseado no DAF, os projetos são limitados ao uso de materiais com baixo amortecimento e dependem da sua massa e rigidez para resistir às forças externas. Dessa maneira, segundo Li *et al.* (2017) a segurança do sistema de pontes geralmente é dependente apenas da força da estrutura ou das funções dos isoladores passivos, o que as tornam incapazes de se adaptar à dinâmica de um ambiente em constante modificação.

Desse modo Li *et al.* (2017) também afirma que, sob a ação de cargas variáveis, a rigidez dos isoladores tradicionais pode não atender aos critérios para restringir o deslocamento da estrutura em resposta à grandes tensões. A atenção voltada a

este problema surgiu da observação de que, quando uma ponte é submetida a sismos, as tensões e a deflexão dinâmica poderiam se tornar consideravelmente maiores do que aquelas para cargas estáticas, e poderiam afetar significativamente a segurança e eficiência da ponte (MOGHADDAS *et al.*, 2011).

Tais perturbações promoveram o conceito de estrutura civil inteligente/adaptativa que Amezquita-Sanchez *et al.* (2013) descreve como uma estrutura capaz de compensar parcialmente perturbações externas indesejáveis; também é capaz de reagir ao ambiente de uma maneira previsível e desejável através da integração de vários elementos. As respostas aos estímulos aplicados em estruturas inteligentes abrangem diversos campos da ciência e da engenharia. Isto se dá por meio da implantação de materiais inteligentes, que segundo Song, Ma e Li (2006), podem ser integrados em estruturas e fornecer funções como detecção, atuação e processos de informação essenciais para o monitoramento, adaptação e cura de estruturas. Alguns exemplos de materiais inteligentes são piezocerâmicas, ligas com memória de forma (SMAs), amortecedores magneto-reológicos (MR) e eletro-reológicos (ER).

2.4 AÇÕES SÍSMICAS

A crosta terrestre é dividida em placas que flutuam sobre o magma, que consistem em um fluido viscoso de alta temperatura. De acordo com a Teoria das Placas Tectônicas, um terremoto, ou abalo sísmico, ocorre devido à movimentação brusca e repentina das placas tectônicas. Estes movimentos, apresentados na Figura 4 são subdivididos em quatro categorias: movimentos transformantes (1), onde há um deslizamento horizontal de forma cisalhante, sem que haja aproximação ou afastamento entre as placas; movimento de subducção (2), no qual ocorre uma sobreposição de uma placa em relação à outra; já nos movimentos divergentes (3), a movimentação das placas ocorre em direções opostas uma à outra e, por fim, movimentos convergentes (4), que são aqueles cujas placas movem-se uma em direção à outra.

Figura 4 - Tipos de movimentos entre placas tectônicas



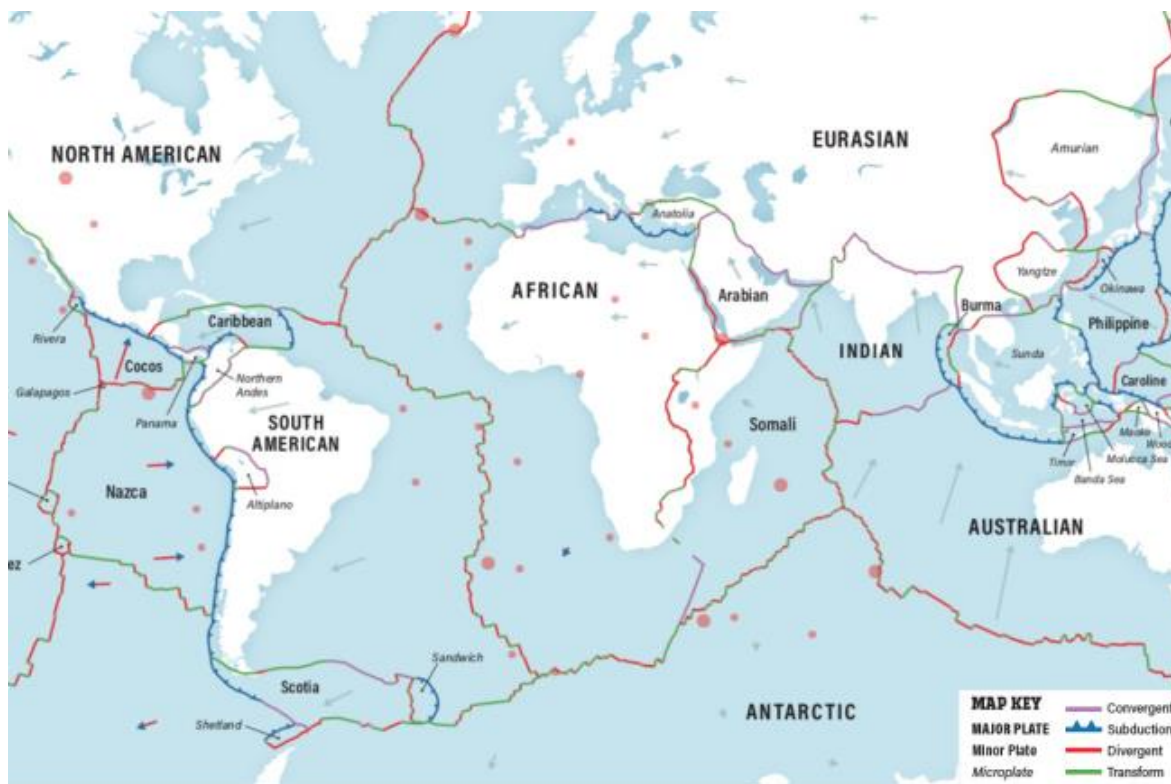
Fonte: Soares (2015)

Não se pode prever com precisão as características exatas da ocorrência de terremotos, como sua intensidade, momento exato de sua ocorrência ou o local afetado, porém através da análises de eventos históricos das zonas sísmicas, é possível, em termos probabilísticos, utilizar destes dados para criar espectros genéricos que pode ser utilizado no dimensionamento de estruturas resistentes aos efeitos causados por sismos de diferentes intensidades. Como os sismos afetam diretamente a integridade das estruturas de uma edificação, há uma busca contínua de aprimoramento nesta área de estudo.

No Brasil, o estudo a respeito de terremotos ainda não desempenha um papel de grande visibilidade devido a maior parte de o território nacional estar em uma zona de baixa atividade sísmica, uma vez que o país está localizado no centro da placa sul-americana, como mostra a Figura 5. No entanto, apesar de ser uma região em que terremotos acontecem com baixas intensidades e pouca frequência, existem porções do território brasileiro onde este fenômeno pode ser observado.

Um exemplo disto é o estado do Acre que está localizado no encontro das placas Sul-americana e Nazca.

Figura 5 - Distribuição das placas tectônicas



Fonte: Tarlach (2019)²

Sendo assim, pesquisas acerca de atividade sísmica vem se tornando um ponto de interesse, principalmente com a criação da NBR15421:2006, denominada “Projetos de estruturas resistentes a sismos – Procedimentos” que coloca o Brasil numa posição mais sensata no cenário sísmico mundial, além de representar um grande avanço técnico na área. Segundo a NBR15421:2006, para efeito da definição das ações sísmicas, deve ser considerado o zoneamento sísmico que são definidos considerando a variação da aceleração sísmica horizontal. Todavia, ainda há lacunas a serem preenchidas se comparadas com normas internacionais bem

² TARLACH, Gemma. Plate Tectonics: The Slow Dance of Our Planet's Crust. Discover. USGS This Dynamic Planet. 12 jun 2019. Disponível em: <https://www.discovermagazine.com/planet-earth/plate-tectonics-the-slow-dance-of-our-planets-crust>.

estabelecidas como a europeia – *EUROCODE 8* – e as norte-americanas – *ASCE 7-10*.

Com o avanço das pesquisas de âmbito internacional, foram observados diversos danos sofridos em estruturas de grande porte, como pontes e viadutos causados por sismos de diferentes magnitudes. Isto reforça a fragilidade deste tipo de estrutura diante deste cenário e ainda ressalta a importância de acoplar um sistema auxiliar de isolamento de vibrações para otimizar o funcionamento da mesma.

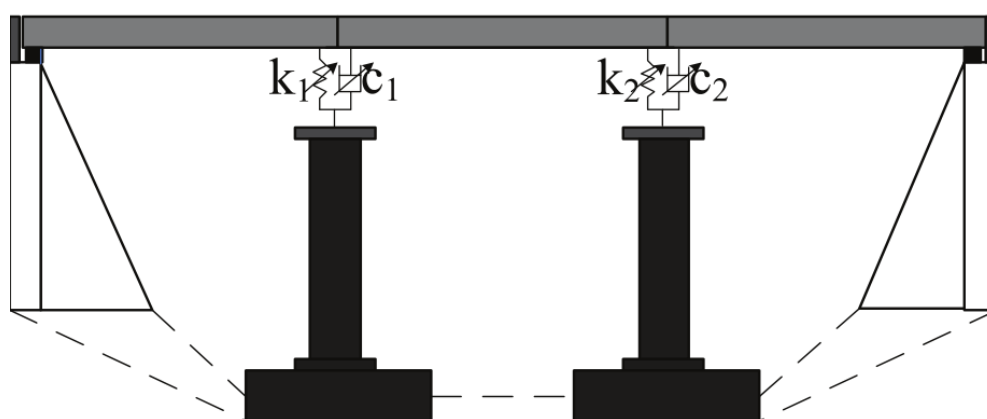
2.5 AMORTECIMENTO DE VIBRAÇÕES MECÂNICAS

Uma estrutura excitada por forças dinâmicas produz vibrações e ruídos cuja origem pode ser tanto interna quanto externa. Entende-se por vibração o movimento de um corpo ou partícula oscilando em torno de um ponto de equilíbrio. Em geral, um sistema inclui um meio para armazenar energia potencial (mola ou elasticidade), um meio para armazenar energia cinética (massa ou inércia) e um meio de perda gradual de energia (amortecedor). Rao (2008) explana que a vibração de um sistema envolve a transferência alternada de sua energia potencial para energia cinética e de energia cinética para energia potencial. Se o sistema for amortecido, certa quantidade de energia é dissipada. A primeira aplicação de dispositivos para eliminar vibrações mecânicas foi desenvolvida por Frahm (1911).

O isolamento de vibrações é um requisito vital em grande parte da engenharia. Sendo assim, Yang (2016) e Shaw (2013) declaram que é necessário evitar a transmissão de vibrações indesejáveis e prejudiciais em pontes, edifícios e outras estruturas por motivos de conforto e proteção, tanto da estrutura quanto dos usuários. Desse modo, em locais propensos a sismos, torna-se indispensável meios de análise de resposta sísmica para dimensionar novas estruturas e avaliar a necessidade de redimensionamento ou reforço de sistemas nas estruturas já existentes.

Grandes amplitudes de vibrações podem ser encontradas no sistema primário de uma estrutura se a frequência de excitação variar, podendo coincidir com uma das frequências naturais do sistema composto, causando ressonância, que resulta em deflexões excessivas e falha. Uma solução proposta para isolar essas vibrações é fixar um sistema secundário ao sistema principal da estrutura, como mostrado na Figura 6, que seja capaz de alterar a frequência natural do sistema, podendo haver variações do posicionamento de acordo com a finalidade do projeto.

Figura 6 - Sistema mecânico da ponte



Fonte: Li *et al.* (2017)

Os sistemas de amortecimento podem ser classificados em três categorias: ativo, semiativo e passivo. As soluções para mitigar a resposta da estrutura sob carregamentos dinâmicos, passaram de sistemas de amortecimento passivos para sistemas de amortecimento ativo ou semiativo, explorando os recentes avanços da tecnologia (CASCIATI; RODELLAR; YILDIRIM, 2012).

2.5.1 Sistema de amortecimento passivo

O método de controle passivo é ativado pelo movimento estrutural (AMEZQUITA-SANCHEZ, 2013; SONG; MA; LI, 2006). Spencer e Nagarajaiah (2003) relata que as estratégias de amortecimento passivo são amplamente aceitas pela comunidade de engenharia como um meio de mitigar os efeitos do carregamento dinâmico nas estruturas. No entanto, segundo Casciati, Rodellar e Yildirim (2012) esses métodos de dispositivos passivos não conseguem se adaptar às mudanças estruturais e aos padrões de uso e condições de carga variáveis.

Komatsuzaki, Inoue e Terashima (2016) afirmam que absorvedores dinâmicos de vibrações passivos são especialmente eficazes quando a frequência de excitação está próxima da sua frequência natural. No entanto, a fixação das propriedades físicas deste sistema de amortecimento pode limitar a aplicação do dispositivo. (LI *et al.*, 2018) mostra que sistemas passivos são projetados para manter a estrutura em condições normais, porém, como não são ajustáveis, muitos desses sistemas podem não ter compatibilidade anti-choque e isolamento de vibrações ao mesmo tempo, tornando-o o elo mais fraco do sistema de segurança da ponte, podendo resultar em danos com mais frequência.

2.5.2 Sistema de amortecimento ativo

O sistema de amortecimento ativo se mostra o oposto do amortecimento passivo, ou seja, podem se adaptar a uma ampla gama de operações e condições estruturais (CASCIATI; RODELLAR; YILDIRIM, 2012). No controle ativo, uma fonte de energia externa controla os atuadores de forma automática para aplicar forças nas estruturas do objeto, desse modo, o movimento da estrutura é controlado por dispositivos integrados a controladores e sensores instalados na própria estrutura, atuando simultaneamente à excitação.

Spencer e Nagarajaiah (2003) mostra que a implementação em escala real dos sistemas de controle ativo foi realizada em várias estruturas, principalmente no Japão para controle e isolamento de vibrações devido a abalos sísmico; no entanto,

a entrada de energia mecânica no sistema estrutural pode resultar em aumentos significativos nos custo de hardware e problemas de confiabilidade (CASCIATI; RODELLAR; YILDIRIM, 2012), com isso, as considerações de custo-eficácia e credibilidade limitaram sua ampla aceitação.

2.5.3 Sistema de amortecimento semiativo

Os sistemas de controle semiativos atingem o compromisso entre os sistemas de controle ativo e passivo, combinando a confiabilidade inerente dos sistemas passivos e a adaptabilidade dos sistemas ativos, sem exigir fontes significativas de energia externa (CASCIATI; RODELLAR; YILDIRIM, 2012). Sendo assim, os dispositivos de controle semiativo usam consideravelmente menos energia para ajustar as propriedades estruturais do que os dispositivos de controle ativos. Devido à sua simplicidade mecânica, requisitos de baixa potência e grande capacidade de força controlável, os sistemas semiativos fornecem uma alternativa atraente aos sistemas de controle ativo e híbrido para redução de vibração estrutural (SPENCER; NAGARAJIAH, 2003). Além disso, eles são inerentemente estáveis.

Dentre os diferentes dispositivos de controle desenvolvidos, o amortecedor magneto-reológico é o dispositivo de controle semiativo mais amplamente estudado devido à sua baixa exigência de tensão e é à prova de falhas (BHAIYA et al., 2019).

2.6 ELASTÔMERO MAGNETO-REOLÓGICO (MRE)

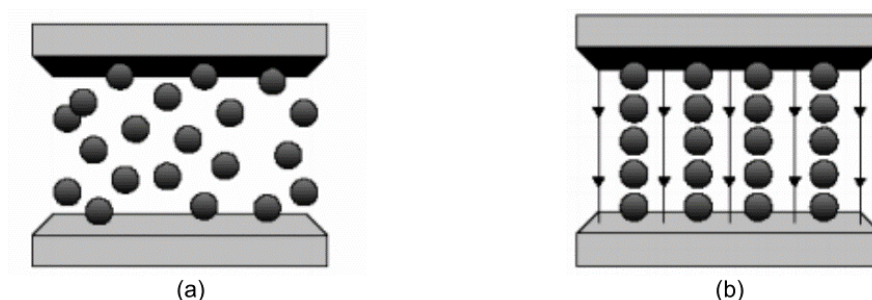
Os Elastômeros Magneto-Reológicos (*Magnetorheological Elastomer* - MRE) são materiais inteligentes cujas propriedades reológicas podem ser controladas por um campo magnético externo aplicado (JOLLY et al., 1996; LI et al., 2010). Seu compósito elastomérico consiste em uma matriz não magnética contendo uma suspensão de partículas magneticamente permeáveis (KHIMI; PICKERING, 2016).

Seu desenvolvimento surgiu para superar problemas como sedimentação e agregação de partículas associadas ao Fluido Magneto-Reológico (*Magnetorheological Fluid* – MRF) (KOMATSUZAKI; INOUE; TERASHIMA, 2016), uma vez que, sendo um elastômero, não há sedimentação das partículas ferromagnéticas.

Como descrito por Khimi e Pickering (2015), as partículas magnéticas utilizadas são ferro carbonila, magnetita, óxidos de ferro, ferrite de bário ou Terfenol-D e os materiais matriciais adequados incluem borracha natural, borracha de silicone, polibutadieno, poliisobutileno, poliisopreno e borracha de poliuretano. Sapouna, Xiong e A Shenoi (2017) descrevem que o MRE com elastômero de matriz macia, como silicone, possui um efeito magneto-reológico mais alto do que MREs feitos de borrachas tradicionais usadas em isoladores de vibração.

A princípio é necessário apenas incorporar uma fonte de campo magnético para alterar as características do MRE. De acordo com Ginder *et al.* (1999), utilizando uma fonte controlável, particularmente um eletroímã de fio elétrico no componente, o fornecimento de corrente elétrica à bobina gera um campo magnético, aumentando assim a rigidez do elastômero. Estas mudanças são não-lineares, completamente reversíveis e ocorrem dentro de poucos milissegundos (KUKLA *et al.*, 2017). As mudanças das propriedades ocorrem sob a influência de um campo magnético, as partículas polarizadas magneticamente formam estruturas organizadas onde as partículas ficam alinhadas devido a polarização magnética, como mostrado na Figura 7, causando mudanças na aparente viscoelasticidade do elastômero (KOMATSUZAKI; INOUE; TERASHIMA, 2016).

Figura 7 - Representação do comportamento das partículas magnéticas: (a) com e (b) sem campo magnético.



Fonte: adaptado por Fukushima (2016)

Segundo Khimi e Pickering (2015), o amortecimento ocorre pelo fluxo viscoso da matriz de borracha e a inclusão de partículas magnéticas que permite um amortecimento adicional através da interação das partículas e do amortecimento interfacial. Ni, Ying e Chen (2011) define os MREs como sendo materiais viscoelásticos lineares, uma vez que o seu comportamento dinâmico pode ser descrito usando um módulo complexo dependente da frequência de vibração e controlável por campos magnéticos externos.

Os Elastômeros Magneto-Reológicos podem ser categorizados em dois grupos, nomeados como MRE isotrópicos e anisotrópicos, no qual atribuem diferentes tipos de alinhamento de partículas polarizadas dentro dos elastômeros.

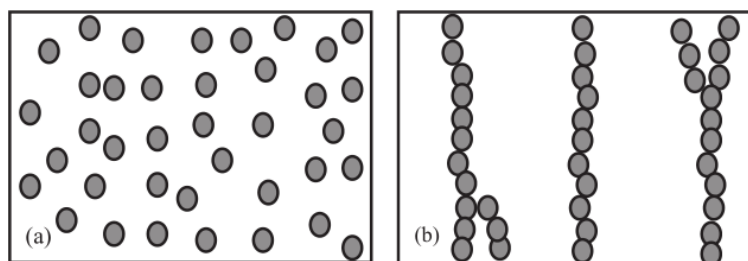
2.6.1 Elastômero magneto-reológico isotrópico

Um material isotrópico é definido como um material cuja propriedades mecânicas são as mesmas em todas as direções. Sendo assim, os MREs isotrópicos, descritos por Khimi e Pickering (2015) podem ser caracterizados por ter uma distribuição uniforme de partículas magnéticas em uma matriz. Neste tipo de elastômero, as partículas polarizadas se dispersam na matriz de forma aleatória (Figura 8a), mostrando um desempenho homogêneo em todas as direções (TIAN; NAKANO, 2017).

Sapouna, Xiong e A Shenoi (2017) comprovam que o MRE isotrópico apresenta uma menor rigidez e amortecimento se comparado ao anisotrópico, o que limita sua eficiência de isolamento em altas frequências quando usados em isoladores de vibração.

Em geral, nos MREs isotrópicos, a rigidez dinâmica e o amortecimento podem ser ajustadas pelo aumento da concentração de partículas ferromagnéticas na matriz. No entanto, foi bem estabelecido na literatura que o efeito magnetoreológico máximo em MRE com matriz de silicone é alcançado quando a proporção partícula/material da matriz é de cerca 30% por volume ou 70% por peso.

Figura 8 - Representação da estrutura das partículas magnéticas no MRE (a) isotrópico e (b) anisotrópico.



Fonte: Khimi e Pickering (2015)

2.6.2 Elastômero magneto-reológico anisotrópico

Os MREs anisotrópicos têm uma estrutura especial semelhante a uma cadeia de partículas magnéticas em uma matriz resultante da cura da matriz sob um campo magnético aplicado. Nesta categoria, segundo Tian *et al.* (2011), *apud* Tian e Nakano (2017), o Elastômero Magneto-Reológico é produzido de maneira que as partículas polarizadas são organizadas durante o processo de reticulação para se alinhar com a direção do campo magnético aplicado (Figura 8b). Devido a isso, Kukla *et al.* (2007) afirma que, deste modo, é possível obter uma estrutura interna orientada espacialmente e fixa.

Esta propriedade singular do MRE se mostra como uma oportunidade de desenvolver isoladores adaptáveis com capacidade de controle em tempo real que poderia superar as deficiências em sistemas tradicionais de isolamento de vibrações em estruturas (YANG *et al.*, 2016).

Recentemente, os amortecedores MREs foram aplicados para controlar a resposta de uma ponte devido às suas características adaptáveis únicas (LIN; LIN, 2011). Desse modo, Luu *et al.* (2014) relata que este tipo de dispositivo poderia ser uma solução interessante para mitigar as excessivas vibrações que essas estruturas podem experimentar. Den Hartog e Ormondroyd (1928) *apud*. Moghaddas *et al.* (2011) mostraram que a introdução do amortecedor não só dissipou a energia, mas também aumentou o intervalo de frequência sobre o qual o dispositivo está ativo.

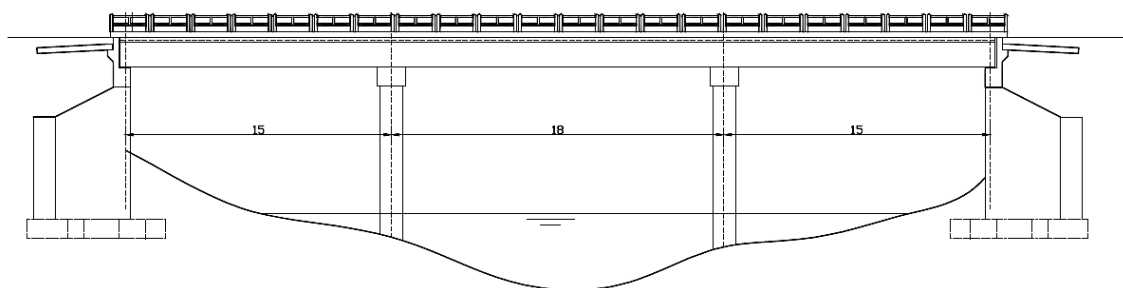
3 METODOLOGIA

Neste capítulo será apresentado a metodologia utilizada na análise do isolamento de vibrações de uma ponte em viga biapoiada contendo MRE como aparelho de apoio em sua estrutura secundária. Através de uma simulação numérica será analisado o comportamento do MRE na estrutura quando submetido a um campo magnético externo, juntamente com os parâmetros do sistema considerando os fatores-chave como: o tamanho, a rigidez e a frequência de excitação do sistema de ponte.

3.1 DIMENSIONAMENTO DA PONTE

Tendo como referência as normas vigentes e o Manual de Obras de Arte Especiais do Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (DNER), a NBR6118 – “Projeto de estruturas de concreto – procedimento” e a NBR 7187 – “Projeto de pontes de concreto armado e protendido – procedimento” foi dimensionada a estrutura de uma ponte rodoviária em viga (Figura 9) para extrair algumas informações primárias. A estrutura da ponte é composta pela superestrutura, que é a parte destinada a vencer obstáculos; mesoestrutura, onde consta os pilares e o encontro com a fundação; e infraestrutura na qual está localizada os elementos de fundação.

Figura 9 - Projeto da ponte em viga – visão geral



Fonte: próprio autor (2021).

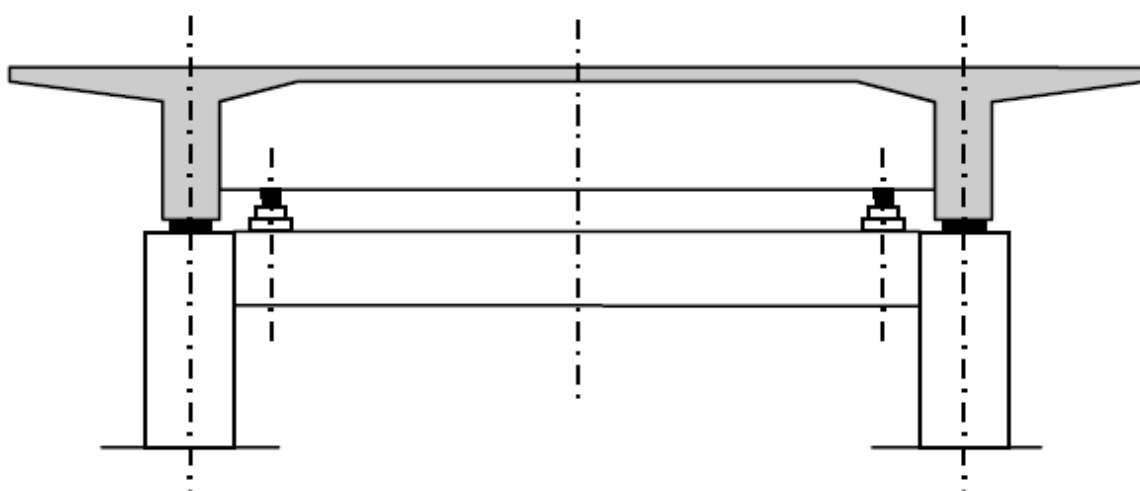
Para efeitos de cálculo, foram feitas as seguintes considerações:

- O tabuleiro da ponte é um corpo rígido;
- A massa de fundação abaixo do solo é desprezada;

3.1.1 Inserção do aparelho do apoio

A necessidade deste elemento intermediário ocorre quando há possibilidade de dois elementos estruturais que se apoiam um sobre o outro sofrer rotação ou deslizamento. Na literatura é possível encontrar diversos tipos de aparelhos de apoio como metálicos, de concreto e elastoméricos. Para a ponte descrita nesta seção, foi fixado um aparelho de apoio constituído por placas de MRE, com o objetivo reduzir os deslocamentos provocados pelas ações sísmicas e pela energia dissipada, como mostra a Figura 10.

Figura 10 - Seção transversal da ponte com aparelho de apoio

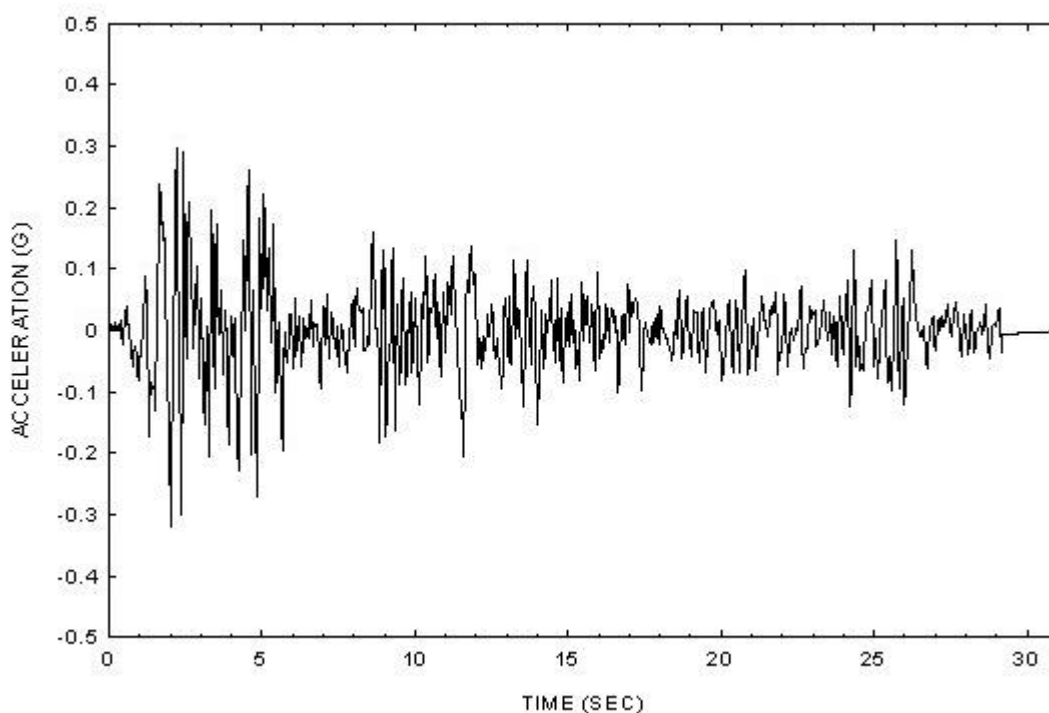


Fonte: adaptado do Manual de Projetos de Obras de Arte Especiais - DNER (1996)

3.2 SINAL DE UM TERREMOTO

Geralmente, um terremoto é referenciado pelo seu tamanho. Por conta disso são utilizadas escalas de magnitude, como a escala Richter. No entanto, para aplicação na engenharia, a melhor forma para analisar um evento sísmico é pela variação da aceleração do solo no tempo. A partir deste sinal é possível extrair parâmetros que servirão como base para entender o comportamento de um terremoto, considerando por exemplo, seu espectro de resposta. A Figura 11 mostra o espectro de resposta do terremoto el Centro, ocorrido em 18 de maio de 1940.

Figura 11 - Aceleração medida do terremoto El Centro



Fonte: VibrationData (2019)³

³ VIBRATIONDATA. El Centro Earthquake North Soul Component. Disponível em: <http://www.vibrationdata.com/elcentro.htm>. Acesso em 15/09/2020.

Segundo a Teoria da Vibração, citado por Li *et al.* (2017), os sinais de terremotos podem ser decompostos em vários sinais de excitação senoidais superpostos. Como a frequência do terremoto está dentro da faixa de 1 a 50Hz, o desempenho do isolamento de vibração com excitação de baixa frequência (abaixo de 50Hz) está relacionado apenas ao sistema de ponte real. Portanto este estudo se concentra apenas na excitação de baixa frequência.

O sinal é inserido na direção longitudinal da estrutura, de forma cisalhante simulando duas situações: um sinal sísmico genérico recomendado pela Sociedade Americana de Engenharia Civil (ASCE) e um sinal de um terremoto real, obtido pela base de dados *PEER Ground Motion Database*⁴.

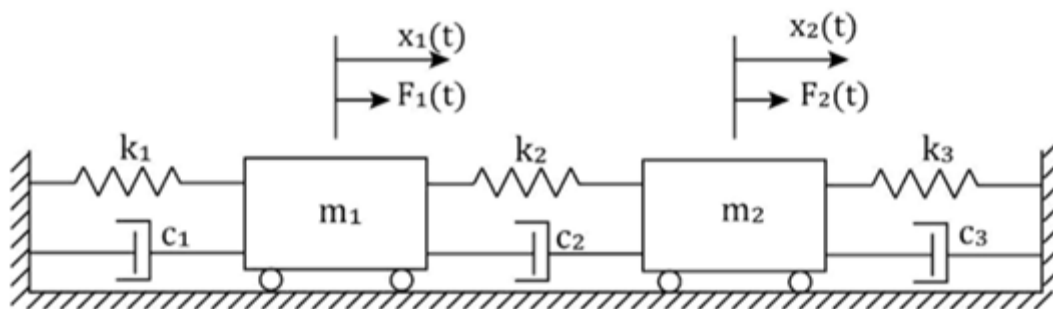
3.3 MODELAGEM DO SISTEMA

O sistema de uma ponte real pode ser muito complexo, em razão disto, a priori foi considerado um sistema de massas concentradas com 2 GDL para modelar o tabuleiro da superestrutura e estudar a similaridade do modelo com a melhor configuração do amortecedor MRE. Como o objetivo é analisar somente as vibrações causadas pelo sismo sobre a ponte, foi adotado como suposição que a estrutura sofreria deslocamento somente na direção longitudinal da superestrutura.

A modelagem começa pela descrição da estrutura, considerando os elementos que a constituem de forma simplificada, assim como as relações existentes entre cada elemento. Este conjunto de elementos formam o modelo espacial da estrutura na qual possui informações da massa e da rigidez do sistema. Junto com os elementos de rigidez, será incluído um modelo de MRE no sistema para descrever os amortecedores. O sistema mecânico definido é apresentado na Figura 12.

⁴ Pacific Earthquake Engineering Research Center (PEER). Ground Motion Database. Disponível em <https://peer.berkeley.edu/peer-strong-ground-motion-databases>

Figura 12 - Modelo do sistema mecânico da ponte.



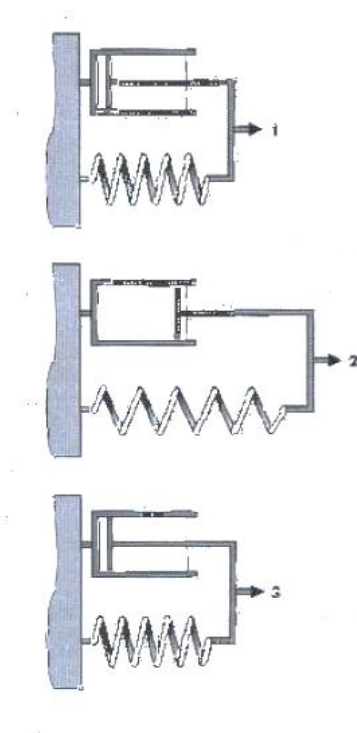
Fonte: adaptado de Rao (2008)

3.4 MODELAGEM DO ELASTÔMERO MAGNETO REOLÓGICO (MRE)

O MRE foi modelado pela teoria de Kelvin-Voigt para representação de sólidos viscoelásticos. Para considerar esta teoria é importante ressaltar alguns aspectos, pontuados por Mezger (2006) e ilustrados na Figura 13:

- (1) O comportamento de um sólido viscoelástico pode ser esquematizado usando uma combinação de mola e amortecedor em paralelo; quando não há carga aplicada o sistema se encontra em repouso sem nenhuma deformação.
- (2) Durante a aplicação da carga, a deformação aumenta na medida em que esta força constante é aplicada, sendo assim, os dois componentes (mola e amortecedor) deformam simultaneamente e com mesmo valor, ou seja, devido a presença do amortecedor, a mola não se deforma de maneira imediata. Isto ocorre porque eles estão conectados por um corpo rígido.
- (3) Ao retirar a força o sistema retorna ao seu estado inicial não deformado, onde a mola coordena o retorno à posição inicial contida pelo amortecedor.

Figura 13 - Comportamento de um sólido viscoelástico



Fonte: Mezger (2006)

Admite-se na eq. 1 que a tensão de cisalhamento aplicada será distribuída em ambos os componentes do modelo, na qual τ_v corresponde ao comportamento viscoso e τ_e corresponde ao comportamento elástico:

$$\tau = \tau_v + \tau_e \quad \text{Eq. 1}$$

Supõe-se também que a deformação de ambos os componentes é igual, isto também se aplica às taxas de cisalhamento, como mostra a eq. 2:

$$\gamma = \gamma_v = \gamma_e \text{ ou } \dot{\gamma} = \dot{\gamma}_v = \dot{\gamma}_e \quad \text{Eq. 2}$$

A Lei de Newton se aplica a elementos viscosos, na qual η corresponde ao módulo de amortecimento (eq. 3):

$$\tau_v = \eta * \dot{\gamma}_v \quad \text{Eq. 3}$$

A Lei de Hooke se aplica a elementos elásticos, na qual G corresponde ao módulo de cisalhamento (eq. 4):

$$\tau_e = G * \gamma_e \quad \text{Eq. 4}$$

A soma das tensões de cisalhamento apresentadas pelas eq. 3 e 4, resultam na equação diferencial, representada pela eq. 5:

$$\tau = \tau_v + \tau_e = \eta \dot{\gamma}_v + G \gamma_e \quad \text{Eq. 5}$$

Ainda considerando que os deslocamentos são iguais, podemos reescrever para a equação 6:

$$\tau(\gamma) = \eta \dot{\gamma} + G \gamma \quad \text{Eq. 6}$$

Sendo assim, os valores do módulo de cisalhamento G e do módulo de amortecimento η foram calculados a partir da equação 7:

$$\eta = \frac{\tau}{\dot{\gamma}} ; G = \frac{\tau}{\gamma} \quad \text{Eq. 7}$$

3.5 FABRICAÇÃO DO ELASTÔMERO MAGNETO REOLÓGICO (MRE)

As propriedades do MRE foram obtidas a partir de uma caracterização de Fukushima (2021), onde foram analisadas amostras do elastômero com diferentes concentrações de ferro carbonila. O MRE utilizado como referência foi confeccionado com uma concentração de 33% de ferro carbonila, uma vez que esta proporção se mostrou a mais eficiente na literatura pesquisada e em estudos anteriores como apresenta Fukushima (2016). Para a fabricação das amostras foi utilizado *Carbonyl iron Sigma > 97% Fe basis* e borracha de silicone branca. A Tabela 2 mostra os materiais utilizados de forma quantitativa.

Tabela 2 - Propriedades do MRE

ESTIMATIVA DE COMPONENTES DAS AMOSTRAS

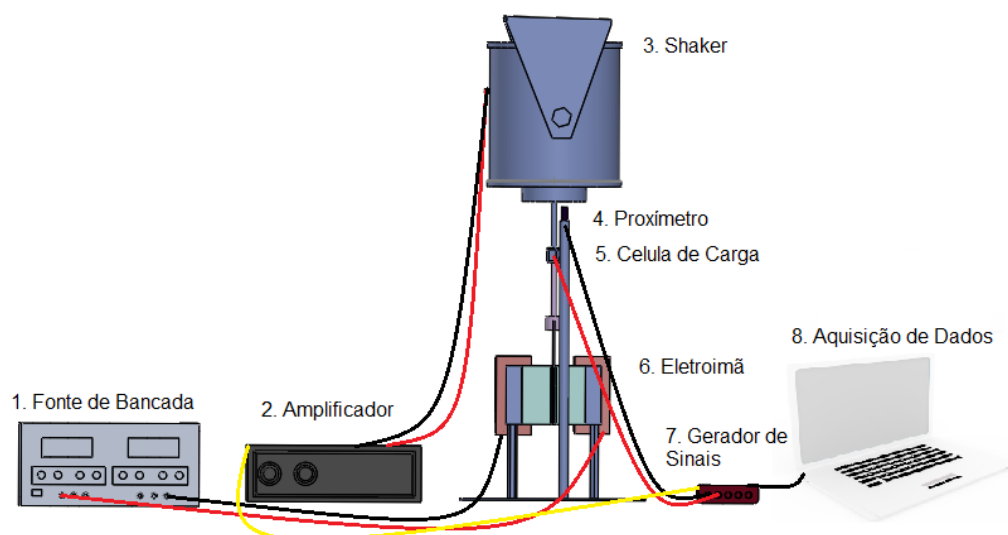
NOME DA AMOSTRA	<i>Fração Si (%v/v)</i>	<i>Massa Si (g)</i>	<i>Fração Fe (%v/v)</i>	<i>Massa Fe</i>	<i>Massa da amostra (g)</i>	<i>Volume da amostra (cm³)</i>
SIFE33	67	0,90	33	2,90	3,80	1,12

Fonte: Adaptado de Fukushima (2016).

O campo magnético considerado se deu através de um eletroímã que forneceu um campo magnético variável e constante entre 0,0T e 0,5T, medidos a partir de um Gaussímetro, no qual foi suficiente para alterar as propriedades mecânicas do Elastômero Magneto-Reológico. A força de excitação foi atribuída através de um gerador de sinais que, passando por um amplificador fornece uma saída e alimenta o *shaker* acoplado ao corpo de prova. O esquema do aparato experimental e o detalhamento do corpo de prova são apresentados nas Figuras 14 e 15, respectivamente.

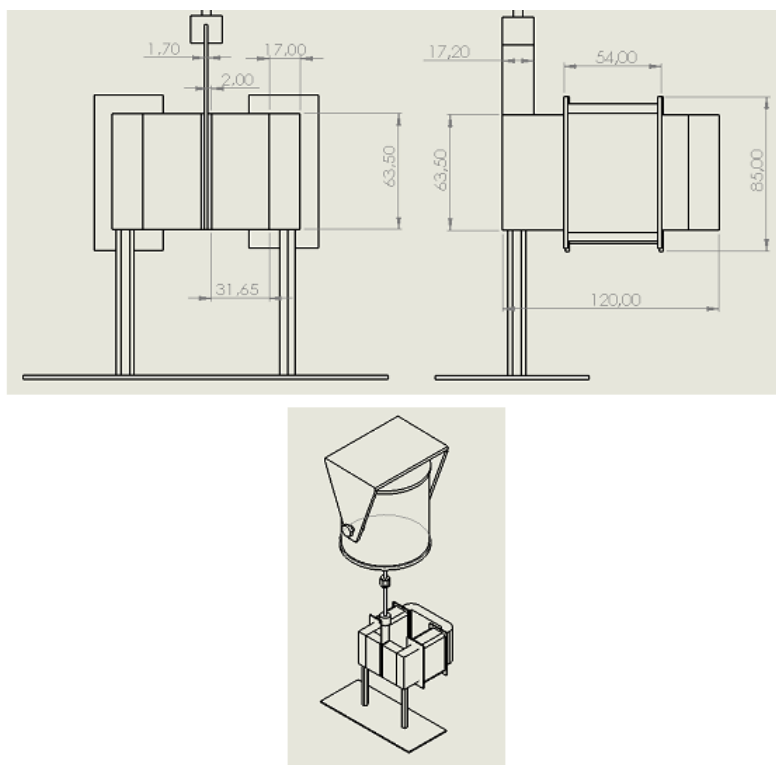
A coleta de dados ocorreu através de um sistema de aquisição, tendo como sinal de entrada força e deslocamento, medidos por uma célula de carga e um proxímetro, respectivamente.

Figura 14 – Esquema do aparato experimental



Fonte: Fukushima (2016)

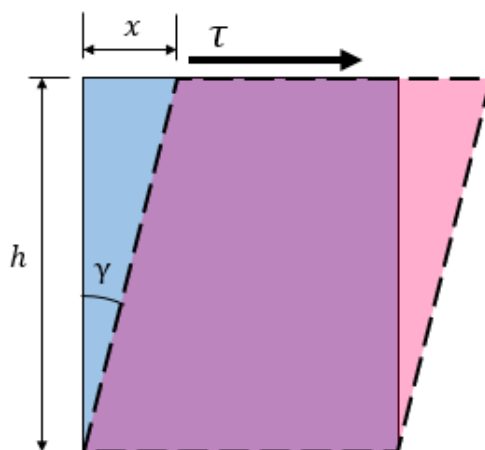
Figura 15 - Detalhamento do corpo de prova



Fonte: Fukushima (2021)

A força de excitação gerada pelo *shaker* provoca uma tensão de cisalhamento τ na amostra de MRE que se deforma em um deslocamento x (Figura 16).

Figura 16 - Deformação devido ao cisalhamento



Fonte: próprio autor (2021)

A tensão de cisalhamento em sua forma básica é dada pela equação 8:

$$\tau = \frac{F}{A} \quad \text{Eq. 8}$$

No entanto, como mostra a eq. 9, ela pode ser deduzida como o produto do módulo de cisalhamento G pelo ângulo γ gerado pelo deslocamento.

$$\tau = G\gamma \quad \text{Eq. 9}$$

Este ângulo pode ser encontrado através da eq. 10:

$$\gamma = \frac{x}{h} \quad \text{Eq. 10}$$

Assume-se que, quando um ângulo é muito pequeno, sua tangente é igual ao próprio ângulo, dessa forma:

$$\text{tg}(\gamma) = \gamma \quad \text{Eq. 11}$$

Substituindo o γ da eq. 9 pela expressão obtida na eq. 10 e aplicando na eq. 8, temos a eq. 12:

$$\frac{F}{A} = G * \frac{x}{h} ; F = \frac{GA}{h} * x \quad \text{Eq. 12}$$

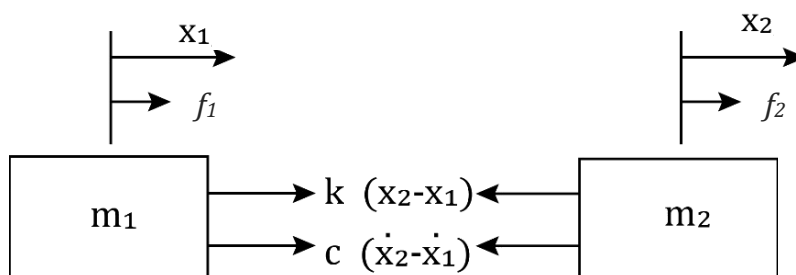
Com isso é possível encontrar a rigidez k , mostrada como a eq. 13.

$$k = \frac{GA}{h} ; F = kx \quad \text{Eq. 13}$$

3.6 EQUACIONAMENTO DO PROBLEMA

Para fazer com que o projeto da estrutura citado na seção 3.3 atenda aos requisitos mecânicos para o sistema de ponte, uma análise teórica foi realizada considerando a rigidez do MRE e a força de cisalhamento horizontal. As coordenadas $x_1(t)$ e $x_2(t)$ descrevem o movimento deste sistema e define as posições das respectivas massas m_1 e m_2 em um instante de tempo t , assumindo as posições de equilíbrio como referência. Os diagramas de corpo livre das massas do sistema mostrado na Figura 3.3 são representados conforme a Figura 17.

Figura 17 - Diagrama de corpo livre do sistema



Fonte: adaptado de Rao (2008)

Ao aplicarmos a equação geral do movimento para cada massa, temos as eq. 14 e 15:

$$f_1 = m_1 \ddot{x}_1 + c \dot{x}_1 - c \dot{x}_2 + kx_1 - kx_2 \quad \text{Eq. 14}$$

$$f_2 = m_2 \ddot{x}_2 - c \dot{x}_1 + c \dot{x}_2 - kx_1 + kx_2 \quad \text{Eq. 15}$$

as equações ainda podem ser escritas matricialmente da forma:

$$[M]\ddot{\vec{x}}(t) + [C]\dot{\vec{x}}(t) + [K]\vec{x}(t) = \vec{f}(t) \quad \text{Eq. 16}$$

na qual $[M]$, $[K]$ e $[C]$ são as matrizes de massa, rigidez e amortecimento, respectivamente, sendo:

$$[M] = \begin{bmatrix} m_1 & 0 \\ 0 & m_2 \end{bmatrix}$$

$$[K] = \begin{bmatrix} k & -k \\ -k & k \end{bmatrix}$$

$$[C] = \begin{bmatrix} c & -c \\ -c & c \end{bmatrix}$$

e os vetores de força e deslocamento são representados por:

$$\vec{f}(t) = \begin{bmatrix} f_1(t) \\ f_2(t) \end{bmatrix}$$

$$\vec{x}(t) = \begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \end{bmatrix}$$

Ao ser aplicado um sinal de terremoto no GDL 2 como um deslocamento imposto, ocorre a eliminação deste GDL na equação. Desta forma, todas as matrizes se tornam de ordem 1, fazendo com que os valores de m , c e k torne-se o próprio modelo espacial da estrutura:

$$[M] = m, \quad [C] = c, \quad [K] = k$$

Para fazer a análise do sistema e obter os resultados desejados, é necessária a representação no domínio da frequência (ω), no entanto os dados são medidos do domínio do tempo (t). Sendo assim, foi aplicado o método de Análise de Fourier, baseando-se principalmente na transformada de Fourier, como mostra a eq. 17:

$$\mathcal{F}([M]\vec{\ddot{x}} + [C]\vec{\dot{x}} + [K]\vec{x}) = \mathcal{F}(\vec{f}) \quad \text{Eq. 17}$$

Aplicando a transformada e fazendo algumas manipulações, temos as equações 18 e 19:

$$-i\omega^2[M]\vec{X} + i\omega[C]\vec{X} + [K]\vec{X} = \vec{F}(\omega) \quad \text{Eq. 18}$$

$$(-i\omega^2[M] + i\omega[C] + [K])\vec{X} = \vec{F}(\omega) \quad \text{Eq. 19}$$

$$[T]\vec{X} = \vec{F}$$

$$\vec{X} = [T]^{-1}\vec{F}$$

Na qual $\vec{X}$ é o deslocamento no domínio da frequência, $\vec{F}$ é a força no domínio da frequência e $[T]$ é a matriz de transferência. Calculando os autovalores desse sistema de equação baseado no equacionamento apresentado por Rao (2008), foi possível extrair a frequência natural ω_0 e o fator de amortecimento ζ através da equação 20:

$$s = \left(-\zeta \pm \sqrt{\zeta^2 - 1}\right) \omega_0 \quad \text{Eq. 20}$$

Como se trata de um projeto hipotético, cujo objetivo primário é analisar o comportamento do MRE, a massa da estrutura foi ajustada de maneira que a frequência natural coincidissem com o sinal sísmico gerando uma ressonância. Através disso foi possível observar a eficiência do MRE em alterar a frequência natural do sistema.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

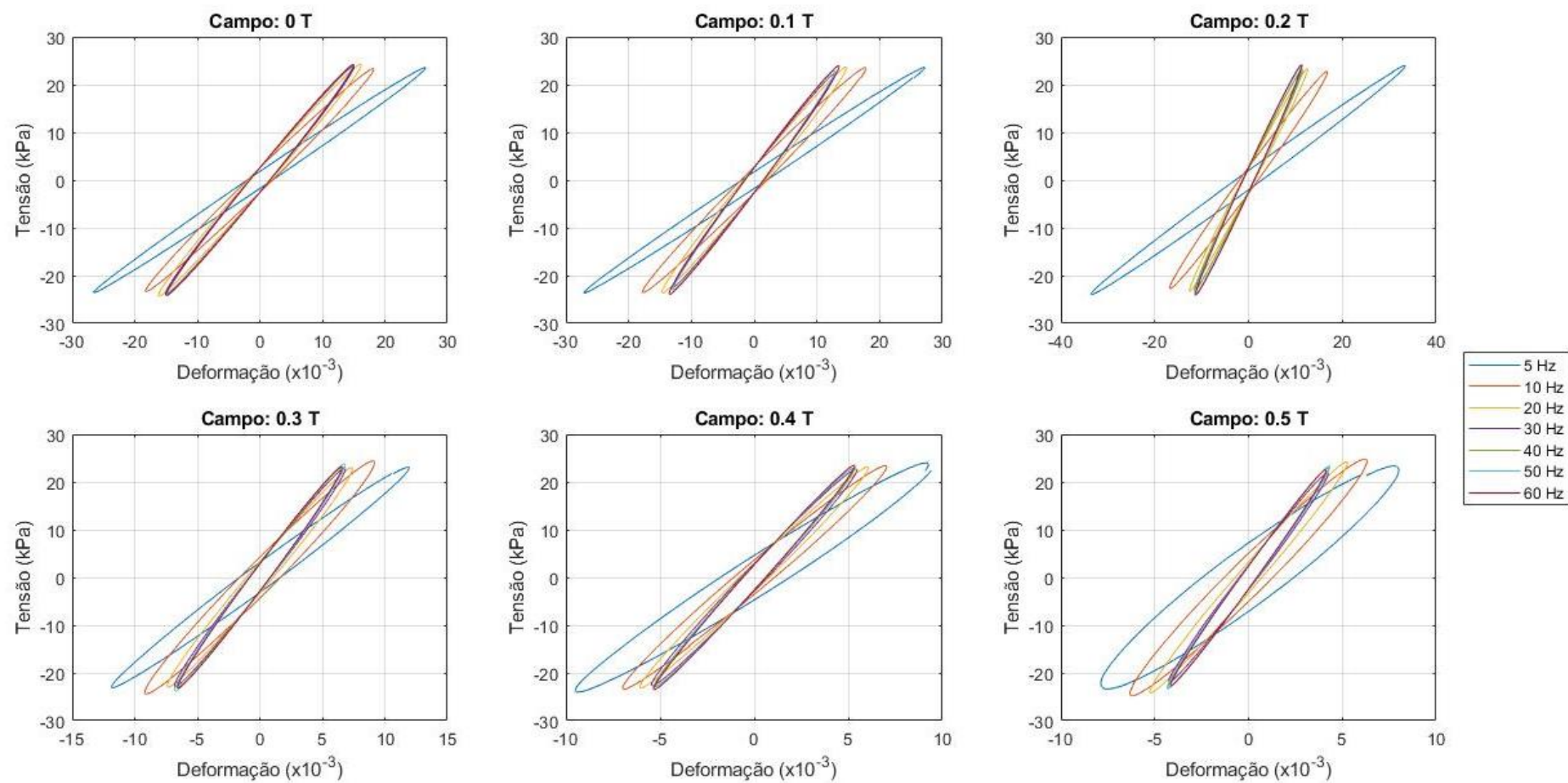
Neste capítulo será apresentado os resultados obtidos através da metodologia citada no Capítulo 3. Partindo da caracterização feita por Fukushima (2021), foi possível extrair os módulos de cisalhamento e amortecimento do material, além de analisar o comportamento da estrutura quando o MRE é submetido a um campo magnético.

4.1. CARACTERIZAÇÃO DO MRE

O Elastômero Magneto-Reológico se enquadra como um material viscoelástico, ou seja, ao sofrer deformação apresenta características entre um material totalmente viscoso e um material totalmente elástico. É esperado que o comportamento elástico não apresente deformação residual, e que o comportamento viscoso não apresente módulo de elasticidade. Devido a isto, o MRE em seu comportamento gráfico forma curvas elipsoidais apresentando inclinação, típico de materiais elásticos, e relaxação, típico de materiais viscosos.

Com base nos conceitos físicos e matemáticos retratados anteriormente, juntamente com as amostras apresentadas por Fukushima (2021) podemos ver com clareza este tipo de comportamento do material. Os gráficos de tensão x deformação obtidos para cada campo magnético no qual o MRE foi submetido são exibidos na Figura 18. É possível observar que, com o aumento da densidade do fluxo magnético, houve uma mudança na inclinação da tensão indicando um aumento do módulo de elasticidade G . Do mesmo modo, nota-se um achatamento da elipse, o que indica aumento no módulo de amortecimento. A quantidade de energia dissipada pelo amortecimento corresponde à área da elipse.

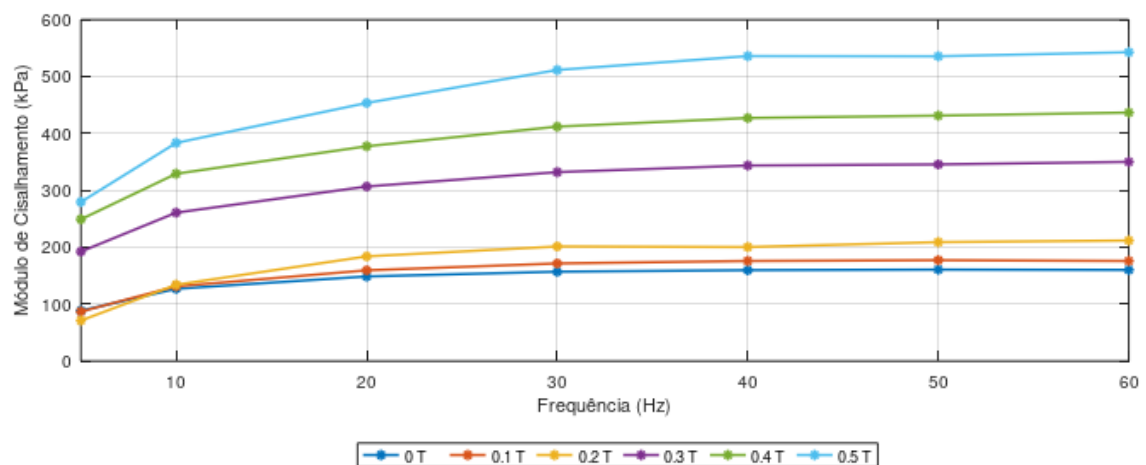
Figura 18 - Gráfico Tensão/deformação do MRE



Fonte: Fukushima (2021)

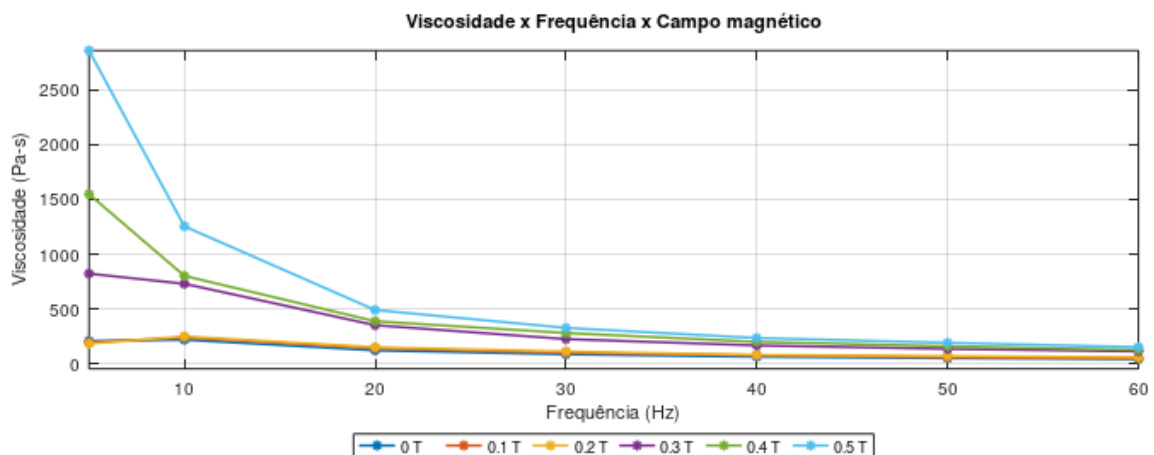
As figuras 19 e 20 mostram o comportamento típico do módulo de cisalhamento e a viscosidade do MRE em função da frequência com diferentes campos magnéticos. Nota-se um aumento do módulo de cisalhamento e decréscimo da viscosidade em função do aumento da densidade do fluxo magnético e em função do aumento da frequência. No entanto, também é possível observar uma variação no campo de 0,2 T. Este comportamento pode ter acontecido em virtude de imprecisões do sistema de instrumentação na fase de coleta de dados. Contudo, os demais resultados estão coerentes com o previsto pelo equacionamento da sessão 3.4.

Figura 19 - Módulo de cisalhamento x Frequência x Campo magnético



Fonte: próprio autor (2021)

Figura 20 - Viscosidade x Frequência x Campo magnético



Fonte: próprio autor (2021)

4.2. FREQUÊNCIA NATURAL E FATOR DE AMORTECIMENTO

A frequência natural do sistema e o fator de amortecimento do MRE foram calculados para cada campo magnético. O campo aplicado sofreu uma variação constante de 0 T a 0,5 T e os resultados obtidos são apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 - Frequências Naturais e Amortecimento

<i>Campo magnético</i>	0,0T	0,1T	0,2T	0,3T	0,4T	0,5T
<i>Frequência natural (Hz)</i>	9,746	9,973	10,114	14,641	16,558	18,322
<i>Fator de amortecimento</i>	0,054	0,058	0,059	0,091	0,077	0,081

Fonte: próprio autor (2021).

É possível observar que, conforme a densidade do fluxo magnético aumenta, há uma alteração da frequência natural, que tende a aumentar. Este comportamento ocorre porque a frequência natural depende diretamente da massa e da rigidez do sistema. Visto que o MRE possui a capacidade de alterar o módulo de elasticidade quando submetido a um campo magnético, é possível modificar os padrões de rigidez do sistema e assim alterar sua região de ressonância.

Juntamente com a variação da rigidez, pode-se notar ainda que o fator de amortecimento também sofre alterações sob o campo aplicado, o que é validado pela revisão da literatura. Nesse sentido, é possível amenizar as amplitudes de vibração numa faixa de frequência crítica tornando a passagem pela ressonância menos danosa, como será mostrada nas simulações.

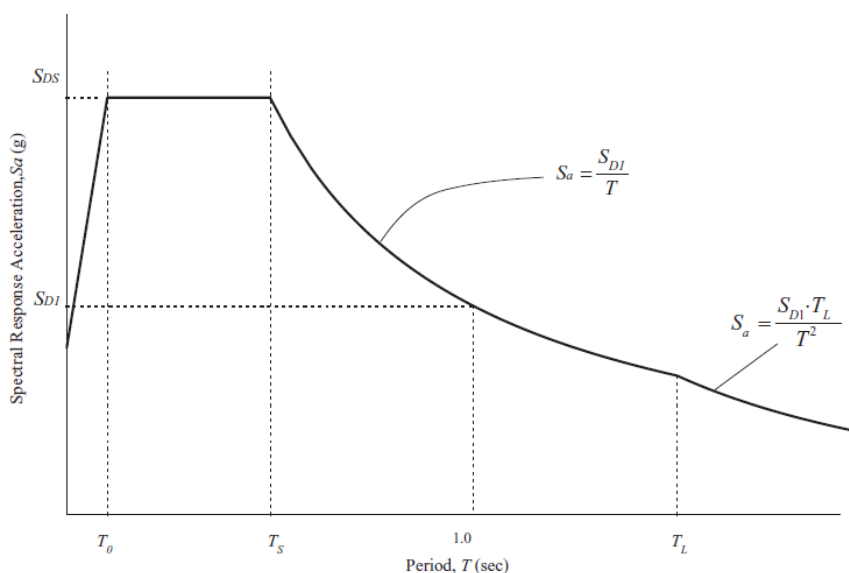
4.3. SIMULAÇÕES

Para esta etapa, o sistema modelado foi submetido a sinais de terremotos coletados a partir de dados da norma norte-americana ASCE7-10 e de medições reais.

4.3.1. Espectro de resposta de projeto

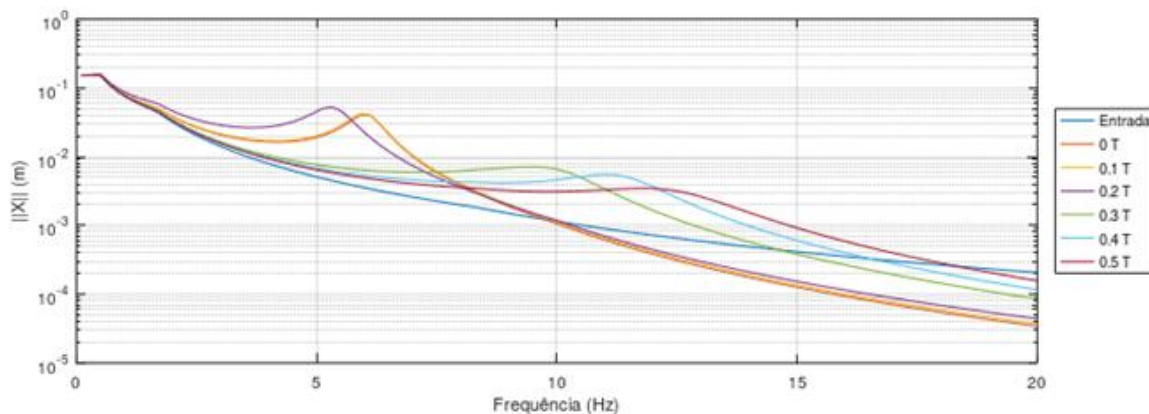
Devido ao fato de as normas norte-americanas serem mais desenvolvidas no âmbito de abalos sísmicos, a ASCE7-10 foi usada como referência para alguns parâmetros. Segundo ela, quando um espectro de resposta de projeto é exigido e os procedimentos de movimento do solo específicos do local não são usados, este espectro deve ser desenvolvido seguindo a referência genérica mostrada na figura 21 como entrada do sistema.

Figura 21 - Espectro genérico da norma ASCE7-10



Fonte: ASCE 7-10 Standart (2010)

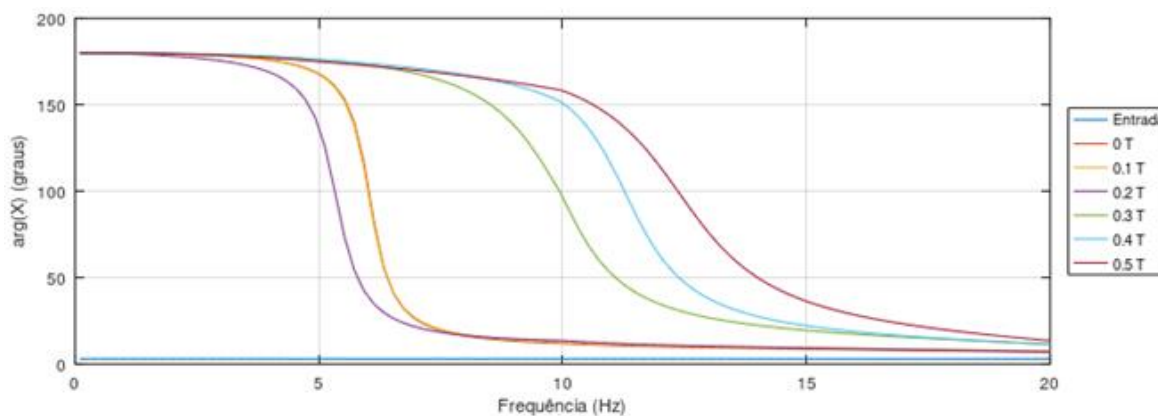
Figura 22 - Amplitude de deslocamento - Norma



Fonte: próprio autor (2021).

Usando o espectro genérico da figura 21 e simulando a estrutura, obtém-se os resultados das figuras 22 e 23. Como esperado, é possível observar a mudança da frequência natural do sistema. Apesar de os picos dos gráficos de amplitude da resposta da figura 22 estarem bastante amortecidos, é possível observar facilmente que a mudança de 90° da fase devido a ressonância ocorre em frequências diferentes na figura 22, o que indica que o MRE é um bom candidato a partir do qual se pode desenvolver um sistema de amortecimento para pontes. Novamente, uma variação no campo de 0,2 T é observada, que corresponde as imperfeições de resultados observados na figura 19.

Figura 23 - Fase - Norma

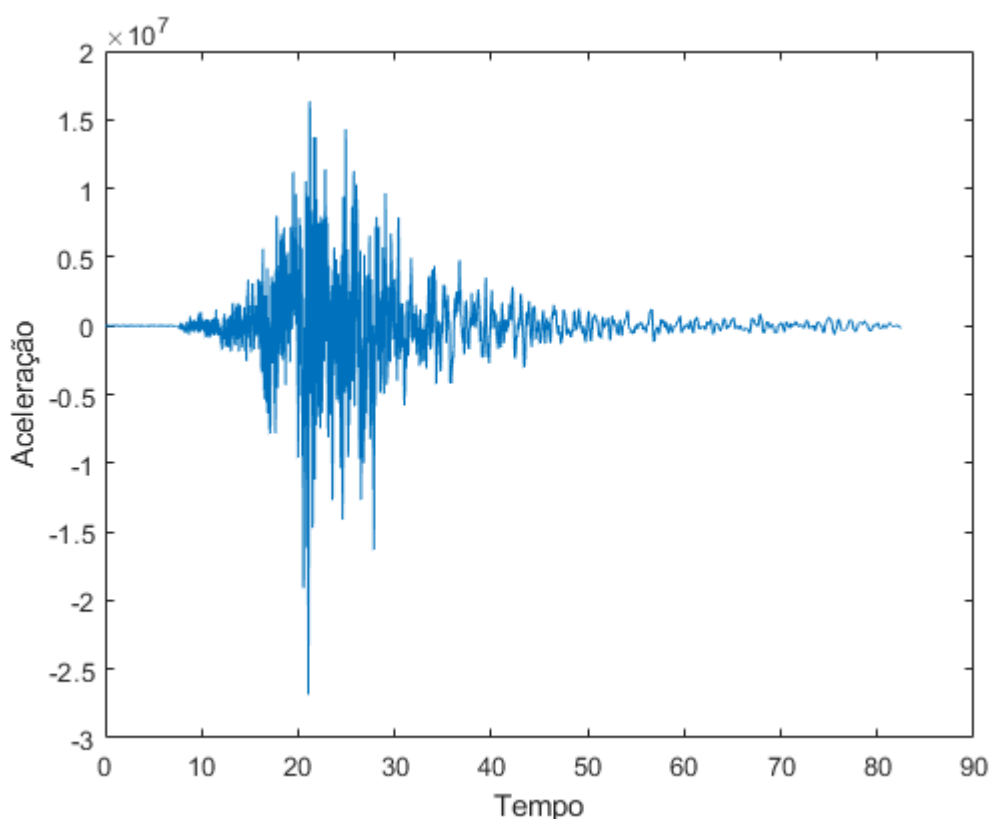


Fonte: próprio autor (2021).

4.3.2. Espectro de resposta de um terremoto real

A Figura 24 apresenta o sinal de um terremoto cujo epicentro ocorreu ao leste do Peru, no dia 25 de Maio de 2019. Os dados foram obtidos através de um banco de dados do Centro de Pesquisa de Engenharia de Terremotos do Pacífico (PEER – *Ground Motion Database*, 2020). Para a simulação, este sinal foi transformado para o domínio da frequência e normalizado pelo valor quadrático médio (RMS) do sinal do tempo.

Figura 24 - Aceleração do terremoto no domínio do tempo – Peru, 25/05/2019

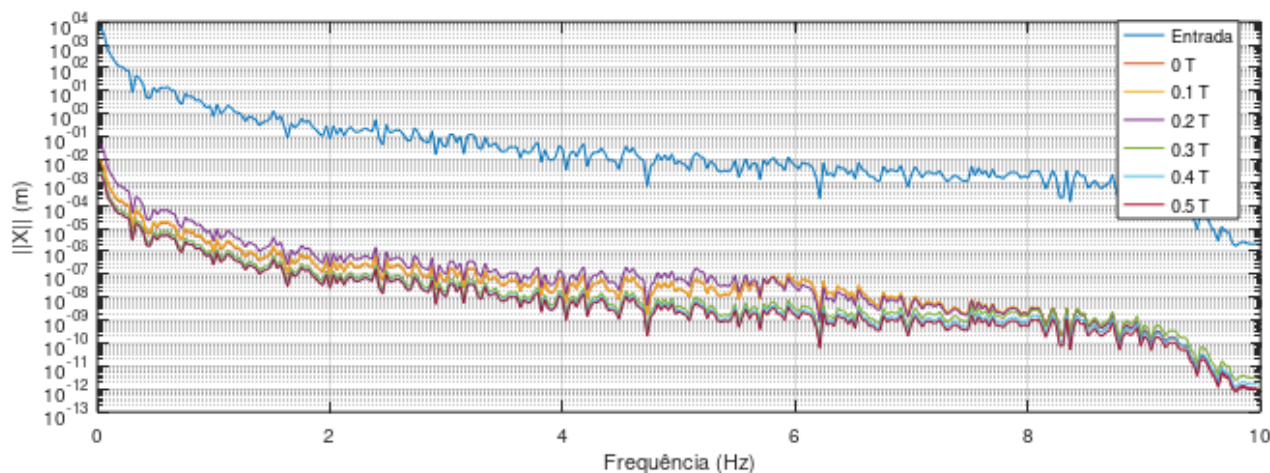


Fonte: próprio autor (2021)

O resultado da simulação usando o sinal do sismo do Peru está ilustrado nos gráficos das figuras 25 e 26. Diferente do espectro genérico da sessão anterior, aqui não é possível identificar os picos de ressonância nem o deslocamento da mudança de 90° da fase devido à mudança da frequência natural. Entretanto,

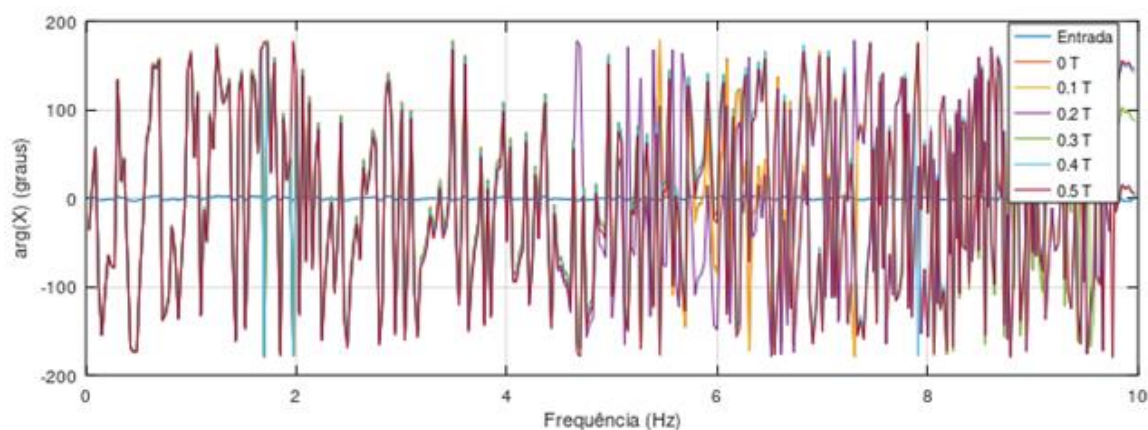
observa-se na figura 4.8 uma redução geral da amplitude da vibração com o aumento do campo magnético.

Figura 25 - Amplitude de deslocamento – terremoto



Fonte: próprio autor (2021)

Figura 26 - Fase – terremoto



Fonte: próprio autor (2021)

4.4. QUANTIFICANDO A MUDANÇA DA RESPOSTA DO SISTEMA

Para avaliar quantitativamente a mudança da resposta do sistema podemos usar o valor quadrático médio (RMS) da resposta em deslocamento. O Teorema de Parseval estabelece que a energia do sinal no domínio do tempo é a mesma que a

do sinal no domínio da frequência, portanto, podemos calcular o valor RMS diretamente dos resultados das simulações no domínio da frequência sem a necessidade de operar a transformada inversa de Fourier. Os resultados são mostrados na Tabela 4 e estão apresentados como sendo a razão em relação ao caso sem fluxo de campo de magnético, isto é, o caso de 0 T.

Tabela 4 - Razão do valor médio quadrático (RMS) da amplitude da resposta da estrutura em relação ao caso de fluxo de campo de 0 T

Densidade do fluxo magnético (T)	Sinal de entrada			
	Norma ASCE7-10	Porcentagem de isolamento	Sismo do Peru	Porcentagem de isolamento
0,0	1	0	1	0
0,1	1,008	-0,8	1,175	-17,5
0,2	1,103	-10,3	5,752	-475,2
0,3	0,935	6,48	0,403	59,60
0,4	0,929	7,10	0,296	70,36
0,5	0,927	7,34	0,285	71,52

Fonte: próprio autor (2021).

Assim como nos resultados apresentados anteriormente nas sessões de 4.1 a 4.3, houve uma variação em 0,1 T e 0,2 T devida as mesmas imprecisões do sistema de instrumentação na fase de coleta de dados. No entanto, quando submetido a uma densidade do fluxo magnético de 0,3 T, 0,4 T e 0,5 T, o MRE se mostra eficiente isolando a vibração em 59,6%, 70,36% e 71,52%, respectivamente com relação ao sinal do sismo. Considerando o sinal ASCE7-10, o isolamento de vibração é 6,48%, 7,10% e 7,34%.

Pode-se observar uma diferença entre a porcentagem de isolamento entre os sinais simulados. Apesar de mostrarem a mesma tendência, os resultados para os espectros da norma ASCE7-10 e do sismo do Peru diferem bastante. Se comparado com a literatura citada no capítulo 2, os resultados mostram que ambos têm consistência satisfatória. A hipótese mais provável para a causa dessa

diferença é pela norma representar um caso de vibração bastante severa, onde os picos de amplitude nas frequências naturais se tornam bastante pronunciados. Mas, como estes picos estão bastante amortecidos, a energia deles se distribui por uma larga faixa de frequência, o que faz com que o nível de energia da resposta se modifique um pouco.

Já no caso do sismo, como os picos nem aparecem, o resultado é a amplitude que se reduz como um todo dentro de toda a faixa de frequência simulada. Ou seja, no caso da norma, há uma compensação da redução devido ao alargamento dos picos, enquanto no sismo, como não há picos para serem alargados, não ocorre tal compensação.

Através dos resultados obtidos, o elastômero magnetoreológico se mostra como uma favorável opção de isolador de vibrações. Como o aumento da rigidez causa a redução do deslocamento e o aumento do amortecimento causa a redução da aceleração, ele é capaz de reduzir os danos causados pela vibração à estrutura da ponte. Ao inserir o MRE no aparelho de apoio, é possível estabelecer uma ligação entre a superestrutura e a mesoestrutura que ajuste a frequência natural para evitar o deslocamento prejudicial durante a ressonância.

5 CONCLUSÃO

Esta pesquisa abordou o comportamento de um Elastômero Magneto-Reológico e a sua utilização como elemento atenuador de vibrações em uma estrutura representada por um sistema massa-mola com um grau de liberdade sujeito a vibrações decorrentes de sismos.

A partir dos resultados obtidos, pode-se concluir que o MRE foi capaz de alterar suas propriedades mecânicas quando submetido a um campo magnético aplicado. Houve um aumento no módulo de cisalhamento do material e o fator de amortecimento também sofreu alterações, o que mostrou uma boa concordância de dados em relação à literatura. Além disso, o material se mostrou eficiente em alterar a frequência natural do sistema, conferindo à estrutura um ajuste dos parâmetros de rigidez e amortecimento para diferentes intensidades de campo magnético.

Sendo assim, por meio das simulações numéricas, foi possível verificar que o MRE posicionado como aparelho de apoio entre a super e a mesoestrutura funciona como uma articulação elástica, permitindo movimentos que possibilitam uma grande deformabilidade sem trazer grandes danos à estrutura. Ainda, conclui-se que a inserção do material foi capaz de amenizar as amplitudes de vibração do sistema numa faixa de ressonância. Por fim, verificou-se que o comportamento durante um evento como terremoto está fortemente relacionado com a frequência natural desse sistema.

6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Para futuros trabalhos, torna-se interessante explorar as possibilidades do MRE para um avanço nos sistemas de controles de vibração mais eficientes do que as soluções habituais, através de variações na frequência natural da estrutura e decorrente redução nas amplitudes de vibração. Ainda, pode-se incorporar um sistema de controle, permitindo um ajuste instantâneo das propriedades, dando ao dispositivo a possibilidade de abranger uma faixa maior de frequência. Além de poder ser implementado isoladores de vibrações com MRE em sistemas mais complexos com n graus de liberdade.

REFERÊNCIAS

- ALTUNİŞIK, Ahmet Can et al. Vibration-based operational modal analysis of the Mikron historic arch bridge after restoration. **Civil Engineering and Environmental Systems**, v. 28, n. 3, p. 247-259, set. 2011. Informa UK Limited. <http://dx.doi.org/10.1080/10286608.2011.588328>.
- AMERICAN SOCIETY OF CIVIL ENGINEERS. **ASCE/SEI7-10**. Minimum Design Loads for Buildings and Others Structures, 2010. 253 p.
- AMEZQUITA-SANCHEZ, Juan Pablo *et al.* Vibration control on smart civil structures: a review. **Mechanics of Advanced Materials and Structures**, London, v. 21, n. 1, p. 23-38, 16 set. 2013. <http://dx.doi.org/10.1080/15376494.2012.677103>.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR7187**: projeto de pontes de concreto armado e de concreto protendido – procedimento. Rio de Janeiro, 2003. 11 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR8681**: Ações e segurança nas estruturas. Rio de Janeiro, 2004. 18 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR15421**: projeto de estruturas resistentes a sismos – procedimento. Rio de Janeiro, 2006. 21 p.
- ATAEI, Shervan; MIRI, Amin. Investigating dynamic amplification factor of railway masonry arch bridges through dynamic load tests. **Construction And Building Materials**, Guildford, v. 183, p. 693-705, set. 2018. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.06.151>.
- BERMUDO, Carolina; SEVILLA, Lorenzo; LÓPEZ, Germán Castillo. Material flow analysis in indentation by two-dimensional digital image correlation and finite elements method. **Materials**, Detroit, v. 10, n. 6, p. 674-674, 21 jun. 2017. G. <http://dx.doi.org/10.3390/ma10060674>.
- BHAIYA, Vishisht *et al.* Modified semiactive control with MR dampers for partially observed systems. **Engineering Structures**, Oxford, v. 191, p.129-147, jul. 2019. <http://dx.doi.org/10.1016/j.engstruct.2019.04.063>.
- CASCIATI, Fabio; RODELLAR, José; YILDIRIM, Umut. Active and semi-active control of structures – theory and applications: A review of recent advances. **o Intelligent Material Systems and Structures**, Lancaster, v. 23, n. 11, p.1181-1195, 6 maio 2012. <http://dx.doi.org/10.1177/1045389x12445029>.
- COSTA, Vanessa Miranda da. **Desempenho e reabilitação de pontes rodoviárias: aplicação a casos de estudo**. 2009. 208 f. Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia, Universidade do Minho, Portugal, 2009.

DUQUE, Daniel; ESPAÑOL, Pep; LATORRE, Jaime Arturo de. Extending linear finite elements to quadratic precision on arbitrary meshes. **Applied Mathematics And Computation**, New York, v. 301, p. 201-213, maio 2017.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.amc.2016.12.010>

FRAHM, H. Device for damping vibrations of bodies. U.S. Patent 989, 1911

FUKUSHIMA, Jeferson Camargo. **Desenvolvimento e caracterização de um elastômero magneto-reológico para aplicação em absorvedores de vibração mecânica**. 2016. 80 f. Dissertação (Mestrado)- Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista “Julio de Mesquita Filho” – Unesp, Ilha Solteira, 2016.

FUKUSHIMA, Jeferson Camargo. **Caracterização dinâmica de elastômero magneto-reológico**. 2021. 115 f. Tese (Doutorado)- Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista “Julio de Mesquita Filho” – Unesp, Ilha Solteira, 2021.

Jolly MR, Carlson JD; MUNOZ BC. A model of the behaviour of magnetorheological materials. **Smart Materials and Structures**, New York, v. 5, n. 5, p. 607–614, 1996.

KHIMI, S. Raa; PICKERING, K. I. Comparison of dynamic properties of magnetorheological elastomers with existing antivibration rubbers. **Composites Part B: Engineering**, Surrey, v. 83, n.1, p.175-183, dez. 2015.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.compositesb.2015.08.033>.

KOMATSUZAKI, Toshihiko; INOUE, Toshio; TERASHIMA, Osamu. Broadband vibration control of a structure by using a magnetorheological elastomer-based tuned dynamic absorber. **Mechatronics**, Oxford, v. 40, p.128-136, dez. 2016.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.mechatronics.2016.09.006>.

KUKLA, Mateusz *et al.* The determination of mechanical properties of magnetorheological elastomers (MREs). **Procedia Engineering**, v. 177, n.1, p. 324-330, 2017. <http://dx.doi.org/10.1016/j.proeng.2017.02.233>.

LI YC, Li JC; LI WH, *et al.* A state-of-the-art review on magnetorheological elastomer devices. **Smart Materials and Structures**, New York, v. 23, n. 12, p. 123001, 2014.

LI, Rui *et al.* Design and testing performance of a magneto-rheological elastomer isolator for a scaled bridge system. **Journal Of Intelligent Material Systems And Structures**, Lancaster, v. 29, n. 2, p.171-182, ago. 2017.
<http://dx.doi.org/10.1177/1045389x17721033>.

LI, Rui *et al.* Semi-active predictive control of isolated bridge based on magnetorheological elastomer bearing. **Journal Of Shanghai Jiaotong University (science)**, v. 24, n. 1, p.64-70, 24 nov. 2018.
<http://dx.doi.org/10.1007/s12204-018-2009-7>.

LIN, Pei-yang; LIN, Tzu-kang. Control of seismically isolated bridges by magnetorheological dampers and a rolling pendulum system. **Structural Control And Health Monitoring**, v. 19, n. 2, p.278-294, 16 jan. 2011. Wiley.
<http://dx.doi.org/10.1002/stc.431>.

LUU, M. *et al.* Semi-active magnetorheological dampers for reducing response of high-speed railway bridges. **Control Engineering Practice**, Oxford, v. 32, n. 2, p.147-160, nov. 2014. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conengprac.2014.08.006>.

MARCHETTI, Osvaldemar. **Pontes de concreto armado**. São Paulo: Blucher, 2008. 248 p.

MARTIN, Francisco José San. **Cálculo de tabuleiros de pontes**. São Paulo: Ciência e Tecnologia, 1981. 228 p.

MEZGER, Thomas G. **The rheology handbook ofr users of rotational ans oscillatory tests**. 2nd ed. Hannover: Vincentz Network GmbH & Co. KG, 2006.

MOGHADDAS, Mahsa *et al.* Vibration control of Timoshenko beam traversed by moving vehicle using optimized tuned mass damper. **Journal Of Vibration And Control**, Thousand Oaks, v. 18, n. 6, p. 757-773, 8 ago. 2011.
<http://dx.doi.org/10.1177/1077546311404267>.

MUSIAŁ, Michał; GROSEL, Jacek. Determining the Young's modulus of concrete by measuring the eigenfrequencies of concrete and reinforced concrete beams. **Construction And Building Materials**, Guildford, v. 121, p. 44-52, set. 2016. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.05.150>.

NI, Yi; YING, Zuguang; CHEN, Zhaohui. Micro-vibration suppression of equipment supported on a floor incorporating magneto-rheological elastomer core. **Journal Of Sound And Vibration**, London, v. 330, n. 18-19, p. 4369-4383, ago. 2011.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.jsv.2011.04.020>.

O'CONNOR, Colin. **Pontes - superestruturas**. 2. ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 1975. 1 v.1 p. 65.

PELKE, Eberhard; KURRER, Karl-eugen. The art of major bridge-building - Hellmut Homberg and his contribution to multiple cable-stayed spans. **Steel Construction**, Birmingham, 5, n. 4, p. 251-265, nov. 2012.
<http://dx.doi.org/10.1002/stco.201210031>.

RAO, S. S. **Mechanical vibrations**. 4. ed. Upper Saddle River: Pearson, 2008.

SAPOUNA, K; XIONG, Y P; A SHENOI, R. Dynamic mechanical properties of isotropic/anisotropic silicon magnetorheological elastomer composites. **Smart Materials And Structures**, New York, v. 26, n. 11, p. 1-12, 13 out. 2017.
<http://dx.doi.org/10.1088/1361-665x/aa8b26>.

SHAW, Alex *et al.* A nonlinear spring mechanism incorporating a bistable composite plate for vibration isolation. **Journal Of Sound And Vibration**, London, v. 332, n. 24, p. 6265-6275, nov. 2013. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jsv.2013.07.016>.

SPENCER JUNIOR, Billie F.; NAGARAJAIAH, Satish State of the art of structural control. **Journal Of Structural Engineering**, Illinois, v. 7, n. 129, p. 845-856, jul. 2003.

YANG, Jian *et al.* Development of a novel multi-layer MRE isolator for suppression of building vibrations under seismic events. **Mechanical Systems And Signal Processing**, London, v. 70-71, n.7, p. 811-820, mar. 2016.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.ymssp.2015.08.022>.