



**ESTUDO NUMÉRICO-EXPERIMENTAL DE EDIFICAÇÕES
ADJACENTES ACOPLADAS UTILIZANDO ELEMENTO INERTER**

AUGUSTO MAGALHÃES DE SOUZA PIPPI

**TESE DE DOUTORADO EM ESTRUTURAS E CONSTRUÇÃO CIVIL
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL**

**FACULDADE DE TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA**

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL**

**ESTUDO NUMÉRICO-EXPERIMENTAL DE EDIFICAÇÕES ADJACENTES
ACOPLADAS UTILIZANDO ELEMENTO INERTER**

AUGUSTO MAGALHÃES DE SOUZA PIPPI

ORIENTADORA: GRACIELA NORA DOZ DE CARVALHO

TESE DE DOUTORADO EM ESTRUTURAS E CONSTRUÇÃO CIVIL

PUBLICAÇÃO: E.TD – XX/23

BRASÍLIA/DF: SET/2023

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL**

**ESTUDO NUMÉRICO-EXPERIMENTAL DE EDIFICAÇÕES ADJACENTES
ACOPLADAS UTILIZANDO ELEMENTO INERTER**

AUGUSTO MAGALHÃES DE SOUZA PIPPI

**TESE DE DOUTORADO SUBMETIDO AO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E
AMBIENTAL DA FACULDADE DE TECNOLOGIA DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE
DOUTOR EM ESTRUTURAS E CONSTRUÇÃO CIVIL.**

APROVADA POR:

**Prof.^a Graciela Nora Doz de Carvalho, Dr. Ing. (UnB)
(Orientadora)**

**Prof.^a Leticia Fleck Fadel Miguel, Dra. (UFRGS/PROMEC - PPGEC)
(Examinadora Externa)**

**Prof. Flávio de Souza Barbosa, DSc. (UFJF/PEC)
(Examinador Externo)**

**Prof. José Luis Vital de Brito, Dr. (UnB)
(Examinador Interno)**

BRASÍLIA/DF, 15 DE SETEMBRO DE 2023.

FICHA CATALOGRÁFICA

PIPPI, AUGUSTO MAGALHÃES DE SOUZA

Estudo numérico-experimental de edificações adjacentes acopladas utilizando elemento *inertor* [Distrito Federal] 2023.

xxvi, 181p., 210 x 297 mm (ENC/FT/UnB, Doutor, Estruturas e Construção Civil, 2023).
Tese de Doutorado – Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia.
Departamento de Engenharia Civil e Ambiental.

1. Controle de vibrações
3. Acoplamento de edifícios
I. ENC/FT/UnB

2. Controle passivo
4. Elemento *inertor*
II. Título (Doutor)

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

PIPPI, A. M. S. (2023). Estudo numérico-experimental de edificações adjacentes acopladas utilizando elemento *inertor*. Tese de Doutorado em Estruturas e Construção Civil, Publicação E.TD – xx/23, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 181p.

CESSÃO DE DIREITOS

AUTOR: Augusto Magalhães de Souza Pippi.

TÍTULO: Estudo numérico-experimental de edificações adjacentes acopladas utilizando elemento *inertor*.

GRAU: Doutor ANO: 2023

É concedida à Universidade de Brasília permissão para reproduzir cópias desta tese de doutorado e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte deste trabalho pode ser reproduzida sem autorização por escrito do autor.

Augusto Magalhães de Souza Pippi
Brasília – DF – Brasil
E-mail: augustopippi@hotmail.com

*Dedico este trabalho aos meus pais **Ana e Cezar** e ao meu
companheiro e marido **Lucas**, vocês foram essenciais para
a conclusão dessa importante etapa da minha vida.
Obrigado por estarem presentes sempre.*

AGRADECIMENTOS

Eu quis desistir, muitas vezes.

Talvez seja estranho começar os agradecimentos da tese desta maneira, porém, é necessário que seja expresso os verdadeiros motivos pelos quais as pessoas encontram-se aqui citadas.

Fazer um doutorado é muito mais que buscar conhecimento científico, é uma jornada de autoconhecimento. O tempo disposto para isso pode parecer muito, ou pouco, depende do ponto de vista. Quantos anos levam para você se autoconhecer? Ou melhor, isso é realmente possível? Independente disso, posso garantir que é tempo suficiente para muitos altos e baixos. Percebi que em vários momentos o problema não foi ler e entender aquele artigo cheio de equações, mas foi perceber o porquê aquilo se tornou um problema.

A resposta estava em mim.

Não que eu fosse um problema, no entanto, eu cometi um erro muito grave: eu esqueci de cuidar de mim. Isso, claro, não foi um processo iniciado no doutorado, porém foi algo constante durante anos. Quando busquei ajuda, havia passado por um episódio terrível de depressão maior (foram dois durante o doutorado). Ainda, fui diagnosticado com transtorno de déficit de atenção e hiperatividade (TDAH). Parece até uma brincadeira né? Esse pequeno relato, de uma curta parte de todos esses anos, é expressar o seguinte conselho:

“Nunca esqueça de você, busque se autoconhecer e façam coisas que deixam vocês felizes.”

O autoconhecimento também me fez refletir sobre o seguinte: é normal, se isso me causa tanta angústia? E eu digo: Não permitam que o “normal” seja algo que faça você esquecer do que você ama.

A maior conquista que eu poderia alcançar é estar escrevendo essas palavras. Vocês são o motivo de eu **não ter desistido**.

Começo agradecendo a ela, Ana Magalhães, minha mãe. É o ser humano mais forte, resiliente e bondoso que eu já conheci. Ah! E que prepara a melhor comida que você poderia provar na vida. Qualquer comida, só dar a receita que ela faz. Sou extremamente grato por ter

a sorte de ser seu filho. Obrigado por tudo e mais um pouco que você faz por mim e pelas pessoas que você ama.

Ao meu pai, Cezar Pippi. Um homem resistente, persistente e sempre preocupado em tornar-se cada dia melhor. Você sempre me incentivou em ir em busca dos meus sonhos. Obrigado pelas palavras de apoio e gratidão. Tenho orgulho de ser seu filho.

Ao meu marido Lucas Henrique, que surgiu em minha vida ainda no começo dessa jornada e se tornou a pessoa mais importante em minha vida. Desenvolvemos uma conexão de amor e cumplicidade que só cresce dia após dia. Você esteve ao meu lado todos os dias e nunca deixou que eu renunciasse ao meu sonho. Agradeço todo o amor, cuidado e paciência (não sei muito bem!) que tem por mim. Obrigado por aceitar dividir a vida comigo, Felícia e Alexei. Te amo, muito! *Ad Aeternum*.

Aos meus familiares, por tudo que fazem para contribuir positivamente em minha vida. Sou muito grato.

Aos meus sogros, Lindomar e Vânia e cunhada Letícia, que nos acolheram diversas vezes em sua casa. Vocês são muito especiais.

À minha orientadora, professora Graciela Doz, por toda paciência, atenção e preocupação que teve comigo. Você é um exemplo de profissional. Dedicada, responsável, extremamente forte e, o mais importante, humana. Obrigado por ter ficado ao meu lado todos esses anos.

À professora Suzana Avila, que esteve presente em todas as etapas de desenvolvimento desse trabalho. Você é uma das pessoas mais inteligentes que já conheci. Obrigado por estar sempre junto, pelas boas risadas e companhias em viagens.

Agradeço ao professor Luis Alejandro Peña, por toda ajuda que você me forneceu tanto nos anos de mestrado quanto no doutorado. Você foi a principal inspiração para eu estudar sobre esse assunto.

Ao professor Marcus Girão, que consumiu longas horas para me auxiliar em diversas etapas do trabalho. Admiro muito o senhor pela sua pessoa, por sua dedicação, pela preocupação com os estudantes e por sua inteligência e conhecimento.

Aos professores Jose Brito e Letícia Fleck, por participarem de importantes etapas do doutorado e fornecerem recomendações indispensáveis para o resultado desse trabalho.

To Professor Mahdi Abdeddaim from the University of Biskra in Algeria, who was essential for me to understand several subjects to develop this thesis. Thank you for your concern and dedication, Best Regards.

I also thank Professor Salah Djerouni from the University of Biskra and Professor Francisco Palacios-Quñonero from the Universitat Politècnica de Catalunya (Spain) for providing significant data for this work.

Um agradecimento especial ao meu amigo e padrinho de casamento Matheus Nunes, que é uma pessoa iluminada. Não tenho nem palavras para tanta gratidão que sinto. Obrigado por todo suporte que você forneceu. Estendo esses agradecimentos à toda sua família.

Agradeço a amiga Yonara Karine, madrinha do meu casamento, por ser essa pessoa maravilhosa que brilha mais que qualquer coisa. Você não nasceu para o anonimato.

Aos amigos Paulo, Rafaela e Railander, que em poucos meses tornaram-se pessoas muito importantes na minha vida. Obrigado pela grande amizade, conversas, risadas e pelos *cookies, brownies* e cafés.

À professora Marília Marcy, por todas as conversas e palavras de apoio.

Aos colegas/amigos da UnB, que estiveram presentes por muito tempo dividindo sala, conversando, rindo e reclamando nos corredores assombrosos do SG-12: Izabel Castro, Érica Nóbrega, Yuri Sotero, Lays Abadio e Romário. O percurso tornou-se mais alegre com vocês.

Aos colegas que conheci em todos esses anos no PECC da UnB: Izabel, Érica, Yuri Sotero, Iago de Almeida, Matheus Silva, Thiago Macedo, Yuri Bessa, Thiago Santana, Wallas, Wilson Sánchez, Jéssica de Souza, Carla Bozzi, Carlos Valbson, Iarly, John, Jerfson, Jonathas, Renan Ribeiro, Manoel, Amir Araghi, Mario Freitas, Sara Brandão, Éder, Danilo Nunes, Laís Barros, Divino, Karyne, Davidson, Nicolas Rojas, Hamilton, Carla, Iana, Mariana, Nataniel, Jéssica Borges, João Paulo, Luiza, Gabriel, Mara, Ana Luiza, Luciano, Rodolfo, Álvaro, Patrícia Cândida, Javier Valencia, Patrícia M., Lívia, Vanessa, Thiarly, Nathaly Sarasty, Paulo, Murilo, Stephanie, Henrique, Bryan, Júlia Borges, Larissa, Luana Borges e Jessica Fall. Peço perdão se acabei esquecendo o nome de alguém, como viram, não foram poucas pessoas e minha memória nunca foi das melhores. Mas saibam que todos foram importantes nessa aventura.

Aos colegas do PPG da UnB, Juliana Posse, Jaime, Daniela e Julian.

Ao Laboratório de Estruturas da UnB (LABEST), por permitir fornecer o espaço e ferramentas para realização dos ensaios experimentais. Em especial, agradeço ao prof. Marcos Honorato, chefe do laboratório, e ao técnico Magno, que concedeu uma ajuda indispensável com a utilização do espaço e manuseio de equipamento.

À Empresa Júnior de Engenharia Mecânica da UnB (TECMEC), que colaboraram com o projeto e desenvolvimento do dispositivo *inertor*. Em especial, agradeço à Caio Braga, um gênio da mecânica. Com certeza terá um futuro de muito sucesso e conquistas. Também, agradeço aos membros Luan Lucas e Luiz Felipe, pela atenção nessa difícil etapa do trabalho.

Ao Laboratório Aberto de Brasília (LAB), por ajudarem a aperfeiçoar o protótipo do dispositivo e fornecer material e peças necessárias para sua confecção. Como agradecimento especial, preciso mencionar o engenheiro João Quintiliano, por toda a disposição e assistência prestada, além de toda sua genialidade para solução de problemas.

Aos melhores amigos da vida: Leonardo Vargas, Alessandra Ferreira, Júlia Costa, Junior Saquetti, Gabriel Ruediger, Anderson Figueira (Nanico), Eduardo Vanin, Cristian Zielke, Marcelo Funez, Thiago Borin e Cristiane Rodrigues, que independente da distância, sempre estiveram prontos para ajudar no que fosse necessário. Estou sempre aqui para vocês.

Em especial ao Mestre Rubens Matheus, que ao longo de muitos anos trocamos realizações, reclamações, desesperos e muitos *memes*. Obrigado por ser tão amigo. Você é único.

Às amigas de Brasília: Kamila, Júlia Stark e Sibelle, por toda a amizade e pelos bons momentos juntos.

Não posso deixar de agradecer à minha psiquiatra Laura Egidio e ao meu psicólogo Francisco Meirelles, que representam um papel importantíssimo de acolhimento em várias situações da minha vida. Obrigado pela preocupação e por me ajudarem a superar a dor.

A todo corpo docente do programa PECC que fizeram parte da minha formação como pesquisador. Também, agradeço aos secretários do PECC Ricardo e Vítor por todo serviço prestado.

A todos os servidores e funcionários da UnB que tive o prazer de conhecer e conviver.

Agradeço à Universidade de Brasília pela experiência, conhecimento, oportunidades e acolhimento por todos esses anos.

Enfim, agradeço a todas as pessoas que conheci no mestrado, doutorado e em Brasília, que fizeram, de alguma forma, minha vida mais leve e feliz, meus sinceros agradecimentos.

À Fundação de Apoio à Pesquisa do Distrito Federal (FAP-DF), pelo apoio financeiro.

À CAPES, pelo apoio financeiro.

“Penso que chega um momento na vida da gente, em que o único dever é lutar ferozmente por introduzir, no tempo de cada dia, o máximo de "eternidade".”

(João Guimarães Rosa)

*Tell me what you can hear
And then tell me what you see
Everybody has a different way to view the world
I would like you to know when you see the simple things
To appreciate this life it's not too late to learn*

Trecho da música *Different world*
(Iron Maiden)

RESUMO

ESTUDO NUMÉRICO-EXPERIMENTAL DE EDIFICAÇÕES ADJACENTES ACOPLADAS UTILIZANDO ELEMENTO INERTER

Autor: Augusto Magalhães de Souza Pippi
Orientadora: Graciela Nora Doz de Carvalho, Dr. Ing.
Programa de Pós-graduação em Estruturas e Construção Civil
Brasília, setembro de 2023

Com uma maior densidade populacional nos grandes centros urbanos, há uma tendência da construção de edifícios mais altos e cada vez mais próximos. A ação de ventos fortes ou atividade sísmica pode gerar vibrações excessivas e até a colisão entre essas edificações. Para evitar isso, técnicas de controle de vibrações têm sido largamente estudadas como o acoplamento estrutural. Na bibliografia, sua eficiência em reduzir os deslocamentos e evitar o efeito de *pounding* entre as estruturas acopladas é comprovada. A ideia central do acoplamento estrutural é conectar duas ou mais edificações adjacentes através de dispositivos de controle estrutural. Ainda, o desenvolvimento de novos dispositivos, como os baseados em *inertor*, trouxe novas possibilidades e soluções para a técnica de acoplamento estrutural. *Inertor* é um elemento em que a força aplicada sobre ele é proporcional a aceleração relativa entre seus terminais. Com isso, o objetivo desse trabalho é estudar numericamente e experimentalmente a utilização de diferentes dispositivos baseados em *inertor* na técnica de acoplamento estrutural. No estudo numérico, é comparado o desempenho de quatro dispositivos distintos (Três dispositivos são baseados em *inertor*) conectando duas edificações adjacentes no controle de suas respostas dinâmicas. Para determinar as características mecânicas de cada dispositivo é utilizado o algoritmo de otimização por enxame de partículas (*Particle Swarm Optimization*). É considerado que a perturbação do sistema é produzida por um processo aleatório de ruído branco com média zero. São aplicadas três funções objetivo distintas a fim de determinar qual melhor se aplica em cada caso. Na fase experimental, são realizados ensaios em uma mesa de vibração utilizando dois modelos do tipo *shear frame* de edificações adjacentes. É projetado e construído um modelo experimental de um dispositivo *inertor* para conectar as duas estruturas. Os resultados indicaram que o elemento *inertor* apresenta diversas vantagens quando aplicado na técnica de acoplamento estrutural. É possível obter maiores reduções nas respostas dinâmicas e sistemas com dispositivos mais econômicos.

Palavras-chave: Edifícios Adjacentes; *Inertor*; Controle Estrutural; Acoplamento Estrutural; Controle Passivo.

ABSTRACT

NUMERICAL-EXPERIMENTAL STUDY OF ADJACENT COUPLED BUILDINGS USING INERTER ELEMENT

Author: Augusto Magalhães de Souza Pippi

Advisor: Graciela Nora Doz de Carvalho, Dr. Ing.

Postgraduate Program in Structures and Civil Construction

Brasília, September 2023

Due the greater population density in large urban centers, there is a tendency to build taller and closer buildings. The action of strong winds or seismic activity can generate excessive vibrations and even the collision between these buildings. To avoid this, vibration control techniques have been widely studied, such as structural coupling. In the literature, its efficiency in reducing displacements and avoiding the pounding effect between coupled structures is proven. The central idea of this method is to connect two or more adjacent buildings through structural control devices. Furthermore, the development of new devices, such as those based on inerter, brought new possibilities and solutions for the structural coupling technique. Inerter is an element in which the force applied to it is proportional to the relative acceleration between its terminals. Thus, the aim of this work is to study the use of different inerter-based devices numerically and experimentally in the structural coupling technique. In the numerical part, the performance of four different devices (three devices are inerter-based) connecting two adjacent buildings in controlling their dynamic responses is compared. To determine the mechanical characteristics of each device, the Particle Swarm Optimization algorithm is used. It is assumed that the disturbance of the system is produced by a random white noise process with zero mean. Three distinct objective functions are applied to determine which one best applies in each case. In the experimental part, experimental tests are carried out on a vibration table using two shear frame models of adjacent buildings. An experimental model of an inerter device to connect the two structures is designed and built. The results indicated that the inerter element has several advantages when applied in the structural coupling technique. It is possible to obtain greater reductions in dynamic responses and systems with more economical devices.

Keywords: Adjacent buildings; Inerter; Structural Control; Structural Coupling; Passive Control.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	1
1.1 JUSTIFICATIVA	4
1.2 OBJETIVOS	5
1.2.1 Geral.....	5
1.2.2 Específicos.....	5
1.3 METODOLOGIA.....	6
1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO	7
2 REVISÃO DA LITERATURA	8
2.1 CONTROLE ESTRUTURAL	8
2.1.1 Controle Passivo	10
2.1.1.1 <i>Dispositivos absorsores</i>	11
2.1.1.2 <i>Dispositivos isoladores</i>	15
2.1.1.3 <i>Dispositivos dissipadores</i>	16
2.2 DISPOSITIVOS BASEADOS EM <i>INERTER</i>	20
2.3 CONTROLE DE VIBRAÇÕES EM EDIFICAÇÕES ADJACENTES POR ACOPLAMENTO ESTRUTURAL	31
2.4 O USO DE DISPOSITIVOS BASEADOS EM <i>INERTER</i> NA TÉCNICA DE ACOPLAMENTO ESTRUTURAL	34
3 FORMULAÇÃO MATEMÁTICA	44
3.1 EDIFÍCIOS ADJACENTES ACOPLADOS POR AMORTECEDOR VISCOELÁSTICO	44
3.2 EDIFÍCIOS ADJACENTES ACOPLADOS POR UM SISTEMA MOLA- AMORTECEDOR-INERTER EM PARALELO	47
3.3 SISTEMA DE ESTRUTURAS ACOPLADAS COM DISPOSITIVOS AIMS E AIS ...	49
3.4 RESPOSTA ESTOCÁSTICA EM ESPAÇO DE ESTADOS.....	52
3.5 OTIMIZAÇÃO POR ENXAME DE PARTÍCULAS	54
4 ESTUDOS NUMÉRICOS.....	58
4.1 CASO 1 – ESTRUTURA DE 3 PAVIMENTOS – ESTRUTURA DE 1 PAVIMENTO	63

4.2 CASO 2 – ESTRUTURA DE 8 PAVIMENTOS – ESTRUTURA DE 4 PAVIMENTO	86
.....	
5 ESTUDO EXPERIMENTAL COM DISPOSITIVO INERTER.....	107
5.1 DISPOSITIVO INERTER EXPERIMENTAL	108
5.2 MODELOS ESTRUTURAIS ANALISADOS.....	111
5.2.1 Modelos numéricos e análise modal das estruturas.....	114
5.2.2 Identificação modal dos modelos experimentais	117
5.3 MESA DE VIBRAÇÃO	122
5.3.1 Verificação da mesa de vibração	123
5.4 DETERMINAÇÃO DA INERTÂNCIA ÓTIMA DO DISPOSITIVO <i>INERTER</i>	127
5.5 RESPOSTAS DINÂMICAS DOS MODELOS ESTRUTURAIS.....	131
5.5.1 Caso 1	131
5.5.2 Caso 2	133
6 CONCLUSÕES.....	137
6.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	140
REFERÊNCIAS	141
ANEXO A.....	166
APÊNDICE A	168

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Classificação dos sistemas de controle de vibrações em estruturas.	9
Tabela 3.1 – Propriedades mecânicas dos dispositivos e limites para otimização.	57
Tabela 4.1 – Parâmetros de solo para FDEP.	60
Tabela 4.2 – Características dos sismos principais.....	61
Tabela 4.3 – Frequências fundamentais das estruturas adjacentes – Caso 1.....	63
Tabela 4.4 – Resultados da análise de otimização DRP – Caso 1.....	65
Tabela 4.5 – Resultados da análise de otimização ENG – Caso 1.	66
Tabela 4.6 – Resultados da análise de otimização ACL – Caso 1.	67
Tabela 4.7 – Diferença dos valores de d_1 e d_2 para o Caso 1.....	69
Tabela 4.8 – Respostas dinâmicas máximas absolutas do Caso 1 – El Centro.	70
Tabela 4.9 – Respostas <i>rms</i> máximas do Caso 1 – El Centro.	71
Tabela 4.10 – Deslocamento relativo máximo entre pavimentos do Caso 1 – El Centro.	72
Tabela 4.11 – Respostas dinâmicas máximas absolutas do Caso 1 – Kobe.....	73
Tabela 4.12 – Respostas <i>rms</i> máximas do Caso 1 – Kobe.....	74
Tabela 4.13 – Deslocamento relativo máximo entre pavimentos do Caso 1 – Kobe.....	75
Tabela 4.14 – Respostas dinâmicas máximas absolutas do Caso 1 – Northridge.	76
Tabela 4.15 – Respostas <i>rms</i> máximas do Caso 1 – Northridge.	77
Tabela 4.16 – Deslocamento relativo máximo entre pavimentos Caso 1 – Northridge.....	78
Tabela 4.17 – Frequências fundamentais das estruturas adjacentes – Caso 2.....	86
Tabela 4.18 – Resultados da análise de otimização DRP – Caso 2.....	87
Tabela 4.19 – Resultados da análise de otimização ENG – Caso 2.	88
Tabela 4.20 – Resultados da análise de otimização ACL – Caso 2.	89
Tabela 4.21 – Diferença dos valores de d_1 e d_2 para o Caso 2.....	90
Tabela 4.22 – Respostas dinâmicas máximas absolutas do Caso 2 – El Centro.	91
Tabela 4.23 – Respostas <i>rms</i> máximas do Caso 2 – El Centro.	92
Tabela 4.24 – Deslocamento relativo máximo entre pavimentos do Caso 2 – El Centro.	93
Tabela 4.25 – Respostas dinâmicas máximas absolutas do Caso 2 – Kobe.....	94
Tabela 4.26 – Respostas <i>rms</i> máximas do Caso 2 – Kobe.....	95
Tabela 4.27 – Deslocamento relativo máximo entre pavimentos do Caso 2 – Kobe.....	96
Tabela 4.28 – Respostas dinâmicas máximas absolutas do Caso 2 – Northridge.	97

Tabela 4.29 – Respostas <i>rms</i> máximas do Caso 2 – Northridge.	98
Tabela 4.30 – Deslocamento relativo máximo entre pavimentos Caso 2 – Northridge.	99
Tabela 5.1 – Características dos componentes principais do <i>inertor</i>	111
Tabela 5.2 – Características das colunas.	112
Tabela 5.3 – Características das vigas.	112
Tabela 5.4 – Massa dos módulos.	112
Tabela 5.5 – Frequências naturais das Estruturas 1 e 2.	115
Tabela 5.6 – Frequências experimentais e valores de FER.	119
Tabela 5.7 – Razões de amortecimento das estruturas.	122
Tabela 5.8 – Inertância ótima determinada para os casos experimentais estudados.	128
Tabela 5.9 – Inertância teórica e real da análise experimental.	130
Tabela 5.10 – Respostas <i>rms</i> experimentais – Caso 1.	132
Tabela 5.11 – Respostas <i>rms</i> experimentais – Caso 2.	134
Quadro A.1 – Registros sísmicos aplicados nas análises numéricas.	166
Quadro Ap.1 – Resultados da otimização VD – Caso 1.	169
Quadro Ap.2 – Resultados da otimização VDI – Caso 1.	170
Quadro Ap.3 – Resultados da otimização AIS – Caso 1.	171
Quadro Ap.4 – Resultados da otimização AIMS – Caso 1.	172
Quadro Ap.5 – Resultados da otimização VD – Caso 2.	174
Quadro Ap.6 – Resultados da otimização VDI – Caso 2.	176
Quadro Ap.7 – Resultados da otimização AIS – Caso 2.	178
Quadro Ap.8 – Resultados da otimização AIMS – Caso 2.	180

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 – Perda de vidas humanas em razão da ação sísmica.....	1
Figura 1.2 – Países com maiores perdas materiais devido a terremotos.	2
Figura 2.1 – ALS acoplado a um edifício.....	12
Figura 2.2 – Esquema de um ACLS.....	12
Figura 2.3 – Sistema de um grau de liberdade com um AMS.....	13
Figura 2.4 – Edifício com base fixa convencional (à esquerda) e com a base isolada (à direita).	16
Figura 2.5 – Amortecedor viscoelástico.	17
Figura 2.6 – Amortecedor viscofluído.....	17
Figura 2.7 – Amortecedor de escoamento metálico.	18
Figura 2.8 – Amortecedor de fricção.....	18
Figura 2.9 – Elemento <i>inertor</i>	21
Figura 2.10 – Modelo mecânico esquemático de um <i>inertor rack-and-pinion</i>	22
Figura 2.11 – Protótipo de um <i>inertor rack-and-pinion</i>	22
Figura 2.12 – Protótipo de um <i>inertor ball-screw</i>	23
Figura 2.13 – Modelo mecânico esquemático de um <i>inertor ball-screw</i>	23
Figura 2.14 – Princípio de funcionamento de um <i>inertor</i> hidráulico.	24
Figura 2.15 – <i>Inertor</i> hidráulico de hélice externa.	24
Figura 2.16 – Modelo de controle de vibrações proposto por Smith (2002).....	25
Figura 2.17 – Modelos de isolamento de base estudados.....	26
Figura 2.18 – Modelo experimental <i>ball-screw</i>	27
Figura 2.19 – Modelo mecânico do AIS.....	27
Figura 2.20 – Modelo mecânico do AIMS.....	29
Figura 2.21 – AIMS conectado com pavimentos mais baixos.	30
Figura 2.22 – Sistema de acoplamento estrutural. Escritório <i>Triton Square, Tokyo</i>	32
Figura 2.23 – Casos estudados pelos autores	34
Figura 2.24 – Modelo mecânico com conexão mola-amortecedor- <i>inertor</i>	35
Figura 2.25 – AMS compartilhado conectado através de um elemento <i>inertor</i>	35
Figura 2.26 – Configurações de edifícios adjacentes.	36
Figura 2.27 – Dispositivo AICLS.....	37
Figura 2.28 – Edifícios acoplado sob base flexível.	38

Figura 2.29 – Modelos de edificações adjacentes com MAICLS.	39
Figura 2.30 – Modelo do dispositivo AVMI.	39
Figura 2.31 – Sistema acoplado com dispositivo SMA-TMDI.	40
Figura 2.32 – Modelo pontes adjacentes acopladas.	41
Figura 2.33 – <i>Inerter-system chain</i>	41
Figura 2.34 – Sistema BSTMDI.	42
Figura 3.1 – Modelo de estruturas adjacentes acopladas.	45
Figura 3.2 – Modelo mecânico para sistema acoplado com elemento <i>inerter</i> em paralelo.	48
Figura 3.3 – Modelo mecânico para sistema acoplado com AIMS/AIS.	50
Figura 4.1 – Casos de estruturas adjacentes estudados.	58
Figura 4.2 – Dispositivos estudados.	59
Figura 4.3 – Espectro de Clough e Penzien aplicado nas análises.	61
Figura 4.4 – Registro de acelerações horizontais dos sismos.	62
Figura 4.5 – Espectros de frequência dos sismos.	62
Figura 4.6 – Razões de resposta dinâmica máximas absolutas – Caso 1 – DRP.	79
Figura 4.7 – Razões de resposta dinâmica máximas absolutas – Caso 1 – ENG.	79
Figura 4.8 – Razões de resposta dinâmica máximas absolutas – Caso 1 – ACL.	80
Figura 4.9 – Razões de resposta dinâmica <i>rms</i> máximas – Caso 1 – DRP.	80
Figura 4.10 – Razões de resposta dinâmica <i>rms</i> máximas – Caso 1 – ENG.	81
Figura 4.11 – Razões de resposta dinâmica <i>rms</i> máximas – Caso 1 – ACL.	81
Figura 4.12 – Razões de resposta dinâmica Δ máximos – Caso 1 – DRP.	82
Figura 4.13 – Razões de resposta dinâmica Δ máximos – Caso 1 – ENG.	82
Figura 4.14 – Razões de resposta dinâmica Δ máximos – Caso 1 – ACL.	83
Figura 4.15 – Média dos deslocamentos absolutos máximos por pavimento – Caso 1 – DRP.	84
Figura 4.16 – Média dos deslocamentos absolutos máximos por pavimento – Caso 1 – ENG.	84
Figura 4.17 – Média dos deslocamentos absolutos máximos por pavimento – Caso 1 – ACL.	85
Figura 4.18 – Razões de resposta dinâmica máximas absolutas – Caso 2 – DRP.	99
Figura 4.19 – Razões de resposta dinâmica máximas absolutas – Caso 2 – ENG.	100
Figura 4.20 – Razões de resposta dinâmica máximas absolutas – Caso 2 – ACL.	100
Figura 4.21 – Razões de resposta dinâmica <i>rms</i> máximas – Caso 2 – DRP.	101

Figura 4.22 – Razões de resposta dinâmica <i>rms</i> máximas – Caso 2 – ENG.	102
Figura 4.23 – Razões de resposta dinâmica <i>rms</i> máximas – Caso 2 – ACL.	102
Figura 4.24 – Razões de resposta dinâmica Δ máximos – Caso 2 – DRP.	103
Figura 4.25 – Razões de resposta dinâmica Δ máximos – Caso 2 – ENG.	103
Figura 4.26 – Razões de resposta dinâmica Δ máximos – Caso 2 – ACL.	104
Figura 4.27 – Média dos deslocamentos absolutos máximos por pavimento – Caso 2 – DRP.	104
Figura 4.28 – Média dos deslocamentos absolutos máximos por pavimento – Caso 2 – ENG.	105
Figura 4.29 – Média dos deslocamentos absolutos máximos por pavimento – Caso 2 – ACL.	105
Figura 5.1 – Características físicas de dispositivos <i>inertor rack-and-pinion</i>	108
Figura 5.2 – Dispositivo <i>inertor</i>	109
Figura 5.3 – Partes integrantes do dispositivo <i>inertor</i>	110
Figura 5.4 – Detalhes do <i>inertor</i> : a) eixo em que o volante é conectado; b) sistema para conexão do dispositivo à estrutura.	110
Figura 5.5 – Módulo do sistema estrutural.	111
Figura 5.6 – Esquemas de análise do Caso 1 e Caso 2.	113
Figura 5.7 – Modelo numérico das estruturas ensaiadas.	114
Figura 5.8 – Modos numéricos da Estrutura 1 – Casos 1 e 2.	116
Figura 5.9 – Modos numéricos da Estrutura 2.	116
Figura 5.10 – Sistema de aquisição de dados.	117
Figura 5.11 – Estrutura <i>shear frame</i> com acelerômetros.	118
Figura 5.12 – Espectro de frequências.	120
Figura 5.13 – Comparação entre os modos de vibração da Estrutura 1.	120
Figura 5.14 – Comparação entre os modos de vibração da Estrutura 2.	121
Figura 5.15 – Índice MAC das duas estruturas.	121
Figura 5.16 – Desenho da mesa de vibração.	122
Figura 5.17 – Mesa de vibração para os estudos experimentais.	123
Figura 5.18 – Histórico de acelerações e espectro de frequências – Motor a 2,0 Hz.	124
Figura 5.19 – Histórico de acelerações e espectro de frequências – Motor a 2,5 Hz.	124
Figura 5.20 – Histórico de acelerações e espectro de frequências – Motor a 3,0 Hz.	125
Figura 5.21 – Histórico de acelerações e espectro de frequências – Motor a 3,5 Hz.	125

Figura 5.22 – Histórico de acelerações e espectro de frequências – Motor a 4,0 Hz.....	126
Figura 5.23 – Histórico de acelerações e espectro de frequências – Motor a 4,5 Hz.....	126
Figura 5.24 – Relação entre frequência do motor e da mesa.....	127
Figura 5.25 – Acelerações de entrada para todos os ensaios.....	128
Figura 5.26 – Volante 1 para o Caso 1.	129
Figura 5.27 – Volante 2 para o Caso 2.	130
Figura 5.28 – Sistema montado para os ensaios – Caso 1.....	131
Figura 5.29 – Respostas de acelerações do Caso 1.....	132
Figura 5.30 – Espectro de resposta do Caso 1.....	133
Figura 5.31 – Sistema montado para os ensaios – Caso 2.....	134
Figura 5.32 – Respostas de acelerações do Caso 2.....	135
Figura 5.33 – Espectro de resposta do Caso 2.....	135
Figura A.1 – Detalhes do dispositivo <i>inertor</i> construído.....	168

LISTA DE SÍMBOLOS, NOMENCLATURAS E ABREVIACÕES

1GDL	1 grau de liberdade;
ACL	Otimização baseada em aceleração;
ACLS	Amortecedor de coluna de líquido sintonizado;
AICLS	Amortecedor <i>Inerter</i> de Coluna de Líquido Sintonizado;
AIMS	Amortecedor <i>Inerter</i> de Massa Sintonizado;
AIS	Amortecedor <i>Inerter</i> Sintonizado;
ALS	Amortecedor de líquido sintonizado;
AMS	Amortecedor de massa sintonizada;
AMS-HC	Amortecedor de massa sintonizada com histerese comprimida;
AMSM	Amortecedor de massa sintonizado múltiplo;
ASCE	Sociedade Americana de Engenheiros Civis (<i>American Society of Civil Engineers</i>);
AVF	Amortecedor viscofluido;
AVM	Amortecedor de massa viscoso;
AVMI	Amortecedores viscosos de massa inercial;
AVMS	Amortecedor viscoso de massa sintonizado;
AV	Amortecedor viscoso;
AVS	Amortecedor de massa viscoso;
BSTID	<i>Backward-shared tuned inerter damper</i> ;
CIOA	<i>Circle-inspired optimization algorithm</i> ;
DBI	Dispositivos baseados em <i>inerter</i> ;
DRP	Otimização baseada no deslocamento relativo entre pavimentos;
EF	Elementos finitos;
ENG	Otimização baseada em energia;

EFDD	<i>Enhanced Frequency Domain Decomposition;</i>
FDEP	Função densidade espectral de potência de intensidade;
<i>FER</i>	Variação de frequência;
FRF	Funções de resposta de frequência;
LAB	Laboratório Aberto de Brasília;
LABEST	Laboratório de Estruturas;
MAC	<i>Modal Assurance Criterion;</i>
MAICLS	Múltiplos Amortecedores <i>Inerter</i> de Coluna de Líquido Sintonizados;
MAIMS	Múltiplos Amortecedores <i>Inerter</i> de Massa Sintonizados;
MATLAB	Matrix Laboratory;
MGDL	Múltiplos graus de liberdade;
MOPSO	<i>Multi-objective particle swarm optimization;</i>
<i>PEER</i>	<i>Pacific Earthquake Engineering Research Center;</i>
PGA	Aceleração pico efetiva;
PSO	Método de Otimização Enxame de Partículas (<i>Particle Swarm Optimization</i>);
<i>rms</i>	<i>Root mean square;</i>
SF	Modelo estrutural <i>shear frame</i> ;
SIB	Sistema de isolamento de base;
SMA-AIMS	<i>Shape memory alloy tuned mass damper inerter;</i>
TECMEC	Empresa Júnior de Engenharia Mecânica da UnB;
UnB	Universidade de Brasília;
VD	Viscoelástico/Viscofluido;
VDI	Viscoelástico/viscofluido com <i>inerter</i> ;
A	Matriz de estado;
<i>b</i>	Coefficiente de inércia;

β	Razão de massa do <i>inertter</i> ;
β_{min}	Razão de massa do <i>inertter</i> mínima;
\mathbf{B}^3	Matriz de inertância dos elementos de ligação entre estruturas acopladas;
\mathbf{B}_t	Matriz de inertância diagonal do AIMS ou AIS;
c_n^3	Coefficiente de amortecimento do elemento de conexão no pavimento n ;
c_i^j	Coefficiente de amortecimento do pavimento i da Estrutura j ;
\mathbf{c}^j	Matriz de amortecimento da estrutura j ;
\mathbf{C}	Matriz de amortecimento do conjunto de 2 estruturas;
\mathbf{C}^3	Matriz que contém os valores de amortecimento do elemento de conexão;
\mathbf{C}_{ee}	Matriz de amortecimento para o sistema acoplado;
\mathbf{C}_t	Matriz de amortecimento diagonal do AIMS ou AIS;
\mathbf{C}_y	Matriz de saída;
\mathbf{D}	Matriz de covariância;
Δ	Deslocamento relativo entre pavimentos;
Dss	Distância do local de medida do epicentro do abalo sísmico;
\mathbf{E}	Vetor de perturbação;
E	Módulo de elasticidade do material;
$E[.]$	Operador de esperança;
F	Força aplicada nos terminais;
ξ	Razão de amortecimento;
ξ_g	Razão de amortecimento do solo;
ξ_f	Razão de amortecimento do filtro;
$\mathbf{f}(t)$	Vetor de força externa;
$\vec{\mathbf{f}}$	Vetor de forças externas nodais;
Φ	Vetor de deformada;

g	Aceleração da gravidade;
\mathbf{I}	Matriz identidade;
I	Momento de inércia da seção transversal;
\mathbf{k}^j	Matriz de rigidez da estrutura j ;
k_n^3	Coefficiente de rigidez do elemento de conexão no pavimento n ;
k_c	Rigidez a flexão de uma coluna;
k_i^j	Coefficiente de rigidez do pavimento i da Estrutura j ;
k_n	Rigidez a flexão de “ n ” colunas;
\mathbf{K}	Matriz de rigidez do conjunto de 2 estruturas;
\mathbf{K}^3	Matriz que contém os valores de rigidez do elemento de conexão;
\mathbf{K}_{ee}	Matriz de rigidez para o sistema acoplado;
\mathbf{K}_t	Matriz de rigidez diagonal do AIMS ou AIS;
L_n	Comprimento de uma coluna;
\mathbf{m}^j	Matriz de massa da estrutura j ;
m_i^j	Massa do pavimento i da Estrutura j ;
M	Magnitude do abalo sísmico;
\mathbf{M}	Matriz de massa do conjunto de duas estruturas;
\mathbf{M}_{ee}	Matriz de massa para o sistema acoplado;
\mathbf{M}_t	Matriz de massa diagonal do AIMS;
σ_d	Desvio padrão dos deslocamentos máximos;
ρ	Relação de rigidez viga-coluna;
\mathbf{p}	Vetor de posição;
\mathbf{P}_c	Matriz de posição esquerda;
\mathbf{P}_r	Matriz de posição direita;
$\mathbf{r}(t)$	Vetor de saídas;

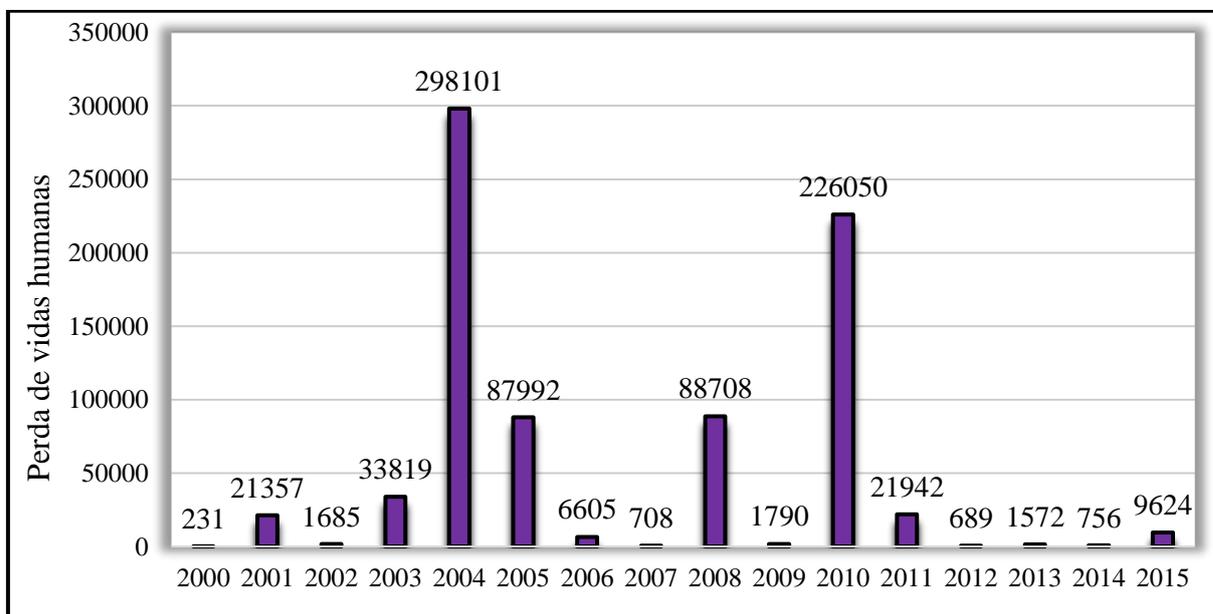
r_i^{resp}	razão de resposta da estrutura i ;
S	Matriz de covariância;
S_0	Intensidade do processo aleatório;
T	Matriz de transformação;
$\bar{\mathbf{u}}$	Vetor de coordenadas nodais;
$\dot{\bar{\mathbf{u}}}$	Vetor de velocidades nodais;
$\ddot{\bar{\mathbf{u}}}$	Vetor de acelerações nodais;
x_3	Grau de liberdade;
\ddot{x}_1	Vetor de aceleração em cada terminal;
\mathbf{x}_{ee}	Vetor de deslocamentos para o sistema acoplado;
$\dot{\mathbf{x}}_{ee}$	Vetor de velocidades para o sistema acoplado;
$\ddot{\mathbf{x}}_{ee}$	Vetor de acelerações para o sistema acoplado;
$x_g(t)$	Processo aleatório gaussiano estacionário;
\mathbf{x}_i^j	Vetor de deslocamento absoluto no tempo calculado em cada pavimento;
$\ddot{\lambda}_g$	Aceleração no solo;
ω_m	Frequência natural circular;
ω_g	Frequência do solo;
ω_f	Frequência do filtro;
$\mathbf{y}(t)$	Vetor de deslocamento de massa do AIMS;
$\mathbf{z}(t)$	Vetor de estado.

1 INTRODUÇÃO

Com a finalidade de economizar espaço nos grandes centros urbanos e acomodar o aumento da densidade populacional, arranha-céus estão sendo utilizados frequentemente. Também, em razão da falta de espaço nesses centros, os edifícios são construídos cada vez mais próximos. Assim, as estruturas tornam-se mais altas e complexas, possuindo uma maior esbeltez e flexibilidade (Bigdeli *et al.*, 2016; He e Lu, 2019). Por efeito dessas características, as ações horizontais, como ventos fortes e terremotos, começam a tomar maior importância. Em conjunto com as baixas frequências naturais dos edifícios altos, as ações dinâmicas são capazes de provocar vibrações excessivas, podendo causar o colapso dessas estruturas.

As ações sísmicas já registraram milhares de mortes e dezenas de milhões de dólares em perdas materiais. Na Figura 1.1 está apresentado um gráfico da quantidade de perda de vidas humanas por ano entre 2000 e 2015, e na Figura 1.2, a quantidade de danos materiais por país, entre os anos 1900 e 2016.

Figura 1.1 – Perda de vidas humanas em razão da ação sísmica.

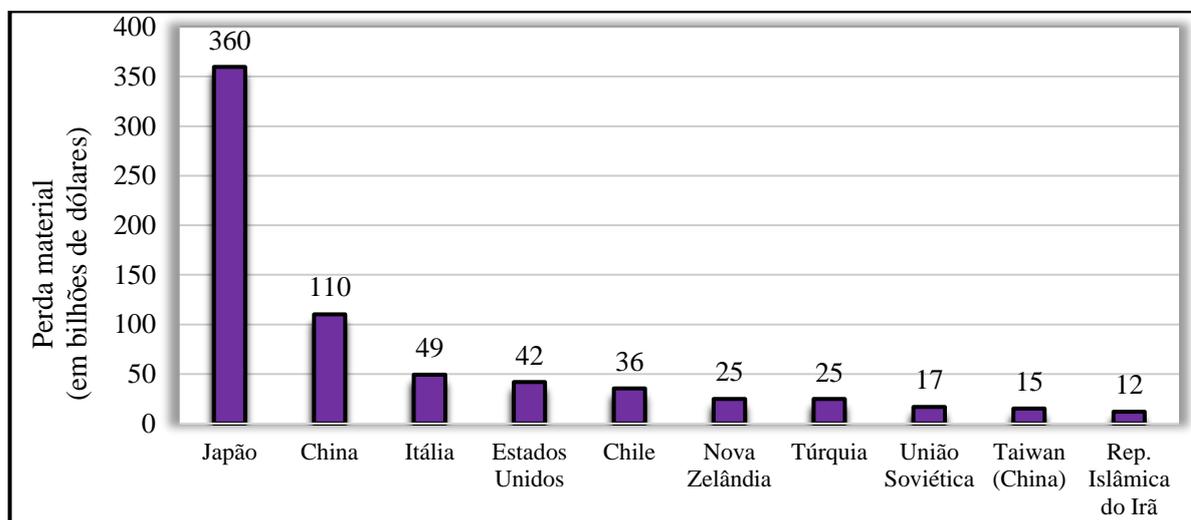


Fonte: *US Geological Survey*

Pode-se perceber a vulnerabilidade da sociedade frente a esses desastres naturais, o que torna a proteção de estruturas civis, a fim de proteger a vida humana e perdas materiais, uma prioridade mundial.

Em 06 de fevereiro de 2023, o sul da Turquia e noroeste da Síria foram atingidos por um forte terremoto de magnitude 7,8. Foram registradas aproximadamente 50 mil mortes e 160 mil edifícios caídos ou com risco de colapso (G1, 2023).

Figura 1.2 – Países com maiores perdas materiais devido a terremotos.



Fonte: CRED (Centre for Research on the Epidemiology of Disasters).

Por outro lado, o controle estrutural é uma das alternativas para obstar o problema das vibrações excessivas. De forma geral, os sistemas de controle são um acervo de técnicas aplicadas para diminuir o dano estrutural causado pelas vibrações excessivas e, principalmente, evitar a ruína da estrutura. Esses sistemas de controle aumentam o nível de segurança das estruturas e podem ser aplicados tanto em construções novas quanto em estruturas já construídas, com pressuposto de não influenciar suas funções principais. Comumente, classificam-se os dispositivos de controle como passivo, ativo, semiativo e híbrido. Esses dispositivos quando instalados na edificação, têm a finalidade de adicionar ou absorver energia de vibração da estrutura, reduzindo assim, as suas respostas dinâmicas (Housner *et al.*, 1997a; Soong e Dargush, 1997; Pippi *et al.*, 2022; Almajhali, 2023).

Os dispositivos do tipo passivo não necessitam de fonte de energia externa para o seu funcionamento. Uma das abordagens do controle passivo é modificar as propriedades físicas e geométricas da estrutura. Outra abordagem é adicionar um dispositivo que aumente a capacidade de dissipação ou que absorva parte da energia de vibração na estrutura. Os controles de vibrações por estratégias ativas empregam sensores para monitorar o estado da estrutura e a natureza da excitação e, assim, um atuador aplica as forças necessárias para minimizar os efeitos das ações dinâmicas. Esses sistemas necessitam de uma fonte externa de energia. Os sistemas

de controle semiativos foram propostos para compensar algumas limitações dos dispositivos de controle passivo, sem a necessidade da quantidade de energia requerida nos sistemas de controle ativo. Finalmente, os sistemas de controle híbrido combinam dois ou mais dispositivos citados anteriormente, com a finalidade de se obter melhores desempenhos.

As técnicas de controle são utilizadas em diversos ramos das engenharias. Sistemas mais aprimorados e diversas aplicações são desenvolvidas em vista de necessidades específicas e por demandas econômicas. Uma técnica sugerida inicialmente por Klein *et al.* (1972), conhecida como acoplamento estrutural, teve como objetivo primário impedir a colisão (*pounding*) entre duas estruturas vizinhas durante abalos sísmicos. Estudos posteriores demonstraram que essa técnica é eficiente também para atenuar a amplitude de vibrações das estruturas acopladas, reduzindo os danos estruturais causados pelas ações sísmicas e ventos fortes. O acoplamento estrutural tem como fundamento conectar duas ou mais estruturas adjacentes através de elementos de ligação, aplicando um ou mais dispositivos de controle. Assim, uma estrutura exerce força de controle sobre a outra, reduzindo a resposta dinâmica de cada estrutura individualmente e do sistema acoplado.

O acoplamento entre estruturas adjacentes é benéfico tanto em aspectos arquitetônicos como funcionais. É uma técnica que está em constante estudo e possui diversas pesquisas com o emprego de diferentes dispositivos de controle como ligação e estruturas com características dinâmicas variadas (Klein e Healy, 1987; Westermo, 1989b; Luco e De Barros, 1998a; Xu *et al.*, 1999; Christenson *et al.*, 2006; Basili *et al.*, 2019; Park e Ok, 2019; Pippi *et al.*, 2019; Peña *et al.*, 2020; Pippi, A. *et al.*, 2020; Pippi, A. S. *et al.*, 2020; Pippi *et al.*, 2022; Hatipoglu e Duzgun, 2023; Kandemir e Jankowski, 2023; Zhang, S. R. *et al.*, 2023).

Um inovador dispositivo de controle do tipo inercial empregando o elemento *inertor* começou a ser utilizado na técnica de acoplamento estrutural. O *inertor* é um elemento de dois nós (dois terminais) em que a força aplicada sobre ele é proporcional a aceleração relativa entre esses terminais. Esses dispositivos inerciais demonstraram grande eficiência no controle das vibrações em diversos ramos da engenharia com o apanágio de não acrescentar uma grande quantidade de massa nas estruturas e de apresentar dimensões reduzidas. Outra vantagem é que o *inertor* consegue potencializar o desempenho de dispositivos de controle como o amortecedor de massa sintonizada, podendo reduzir suas dimensões, a qual, é um limitante da sua utilização (Giaralis e Taflanidis, 2018; De Angelis *et al.*, 2019). O espaço entre as estruturas adjacentes na técnica de controle estrutural pode ser uma restrição de sua aplicação. Dessa forma, é

importante o estudo de dispositivos que sejam eficientes, que possuam menores dimensões e que possam ser utilizados com segurança nos diversos ramos da engenharia de controle.

Poucos trabalhos sobre a técnica de controle por acoplamento estrutural aplicando como elemento de conexão os dispositivos baseados em *inertor* (DBI) estão disponíveis na literatura (Pippi *et al.*, 2022). Também, não é possível encontrar estudos experimentais sobre esse assunto.

1.1 JUSTIFICATIVA

A aplicação do elemento *inertor* tem origem em sistemas de suspensão de veículos. Esses estudos tratam da substituição de amortecedores convencionais em carros por amortecedores que possuem um elemento *inertor*. Posteriormente, esses Dispositivos Baseados em *Inertor* (DBI) foram aplicados em pesquisas sobre motocicletas de alta performance e em trens de pouso de aviões. Além de melhorar a estabilidade dos sistemas, os DBI apresentam grande capacidade de controlar vibrações com a vantagem de possuir dimensões reduzidas (Smith, 2002; Smith e Wang, 2004; Lazar *et al.*, 2014; Dong *et al.*, 2015; Feng *et al.*, 2023; Song *et al.*, 2023; Wagg, 2023).

No controle de vibrações em edifícios, o uso de DBI demonstrou boa performance em sua utilização isolada e na sua aplicação conjunta em sistemas de isolamento de base e em amortecedores de massa sintonizada (AMS). Os dispositivos inerciais com *inertor* têm a habilidade de melhorar as vantagens dos sistemas de controle e diminuir suas desvantagens. Por exemplo, com o emprego de um elemento *inertor* em um dispositivo AMS é possível atenuar não apenas as vibrações excessivas na frequência sintonizada do AMS, mas também as vibrações em frequências mais altas da estrutura (Marian e Giaralis, 2013; Marian e Giaralis, 2014; Giaralis e Petrini, 2017a; Chen *et al.*, 2019).

Recentemente, Basili *et al.* (2017) aplicaram um elemento *inertor* no acoplamento entre duas estruturas adjacentes. Posteriormente, dois trabalhos sobre o assunto foram publicados pelos autores: Basili *et al.* (2018) e Basili *et al.* (2019). Os resultados desses estudos indicaram que é possível obter respostas muito baixas de deslocamento perto das zonas ressonantes. Porém, esses trabalhos são focados na resposta modal do sistema e na sensibilidade de parâmetros como o valor da inertância (constante do *inertor*), amortecimento e rigidez da ligação. Os trabalhos de Palacios-Quiñonero *et al.* (2017) e Palacios-Quiñonero *et al.* (2019) utilizam o elemento *inertor* na conexão entre edificações adjacentes em conjunto com um AMS

de forma numérica. Foi possível averiguar a eficácia desse DBI e a redução significativa da massa do AMS sem prejudicar a performance no controle das vibrações do sistema acoplado.

Os estudos citados pouco exploram as diferentes configurações de DBI no acoplamento entre as edificações, não sendo possível compreender efetivamente qual o ganho de performance em comparação com diferentes dispositivos de conexão. A falta de estudos experimentais também compromete o entendimento do comportamento real desses sistemas.

Por fim, a base de dados sobre mecanismos *inerters* quando se aplica a técnica de acoplamento estrutural é bastante limitada (Pippi *et al.*, 2022). Os dispositivos de controle baseados no *inerters* presumem ser um bom recurso para fatores limitantes da técnica de acoplamento estrutural. Por exemplo, edifícios já construídos e que possuam pouco espaço entre si para a instalação de um dispositivo de controle. Vale ressaltar ainda que os DBI são facilmente construídos, dispendo de fácil instalação e manutenção, sem a necessidade do emprego de alta tecnologia.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Geral

O principal objetivo desse trabalho é compreender as vantagens da técnica de acoplamento estrutural em dois edifícios adjacentes submetidos a dois tipos de excitação, ações sísmicas (análise numérica) e periódica (experimental), utilizando em sua conexão um dispositivo baseado em *inerters*.

1.2.2 Específicos

- Avaliar a eficiência do uso de amortecedores viscosos na ligação entre duas estruturas adjacentes para redução das respostas dinâmicas;
- Verificar o comportamento do sistema acoplado, quando conectado com DBI;
- Avaliar quais as vantagens e desvantagens de diferentes DBI em relação a amortecedores viscosos;
- Estudar, experimentalmente, o comportamento de duas estruturas adjacentes acopladas com DBI.

1.3 METODOLOGIA

Esse trabalho realiza um estudo numérico e experimental sobre a técnica de acoplamento estrutural com dispositivos baseados em *inertor* (DBI).

O estudo numérico faz uso de duas estruturas adjacentes modeladas como *shear frame* com múltiplos grau de liberdade (MGDL). As estruturas são acopladas através de diferentes dispositivos de controle de vibrações. São apresentados dois casos de edificações adjacentes. Os casos contemplam edifícios de alturas distintas, caracterizando edifícios com uma maior rigidez e estruturas mais flexíveis. Para estabelecer a quantidade, posição e propriedades mecânicas ótimas para cada caso é realizada uma análise de otimização.

A parte experimental desse trabalho possui o objetivo de analisar o desempenho de DBI na técnica de acoplamento estrutural. Os modelos de edifícios adjacentes são construídos como estruturas do tipo *shear frame*. As estruturas são submetidas às acelerações na base produzidas a partir de uma mesa de vibração. Na análise experimental, também se aplicam dois casos de edifícios adjacentes com características dinâmicas distintas. É projetado e construído um dispositivo *inertor* para conectar as estruturas.

São realizados ensaios de vibração livre para identificação modal em cada estrutura. Os resultados são validados a partir dos modelos numéricos dessas estruturas. Os dados experimentais são tratados e analisados no *software* ARTeMIS Modal[®]. Finalmente, os ensaios para cada caso de edifícios adjacentes são executados. Primeiro são realizados ensaios para o sistema não acoplado. Depois, o sistema é acoplado através do dispositivo *inertor*.

Por fim, é destacado que as análises numéricas são executadas no *software* MATLAB[®] (MATrix LABoratory) v.13 da MathWorks Inc e são realizadas em um *notebook* DELL G7-7588 com as seguintes especificações:

- Processador: 8ª geração Intel[®] Core™ i7-8750H (Seis núcleos, cache 9M, 2,20 GHz até 4,10 GHz);
- Sistema operacional: Windows 10 (64 bits);
- Memória RAM: 16GB DDR4 2666MHz;
- Placa de vídeo: NVIDIA[®] GeForce[®] GTX 1050Ti com 4GB GDDR5;
- Unidade de Estado Sólido SSD de 512GB.

1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO

Este trabalho é separado em 6 capítulos. No capítulo de introdução é apresentada a relevância do tema e as lacunas do assunto que serão preenchidas durante esse estudo, os objetivos gerais e específicos e a metodologia do trabalho.

No segundo capítulo é desenvolvida uma revisão de literatura que inclui os principais e, também, os mais recentes trabalhos sobre o tema dessa pesquisa. Inicialmente, é realizado um panorama geral sobre o controle estrutural. Após, é desenvolvida uma revisão sobre o elemento *inertor* e suas aplicações. Então, é abordado sobre a técnica de acoplamento estrutural e, por fim, o uso de DBI como elemento de conexão entre estruturas adjacentes.

A formulação matemática está apresentada no terceiro capítulo. É desenvolvido aqui, o equacionamento aplicado nas análises numéricas dessa pesquisa. São demonstradas as equações do movimento para um sistema de duas estruturas adjacentes modeladas como *shear frame*, com múltiplos graus de liberdade (MGDL) e acopladas com cada um dos quatro dispositivos utilizados. Também, é realizada uma apresentação do algoritmo de otimização por enxame de partículas e, por fim, as funções objetivo aplicadas nas análises são descritas e referenciadas.

No capítulo 4 são realizadas as análises numéricas de edifícios acoplados com DBI. Dois casos de edificações adjacentes com MGDL são considerados. Para cada caso, são comparadas as respostas dinâmicas das edificações acopladas com quatro dispositivos distintos, sendo três DBI.

No quinto capítulo estão apresentados os resultados da análise experimental. Um dispositivo *inertor* foi projetado e construído com a finalidade de conectar duas estruturas *shear frame* adjacentes. Os ensaios são realizados sob uma mesa de vibração.

Por fim, no capítulo 6 estão relatadas as considerações finais desse trabalho. Também, são sugeridos temas para trabalhos futuros.

2 REVISÃO DA LITERATURA

Este capítulo apresenta uma síntese dos principais assuntos desse trabalho, evidenciando o estado da arte de cada conteúdo e as principais conclusões obtidas até o momento. Inicialmente, é evidenciado um panorama sobre o controle estrutural, passando pelos principais dispositivos de controle para mitigação de vibrações em edifícios. Em seguida, é apresentada uma revisão sobre o elemento *inertor*. A seguir, é abordada a técnica de acoplamento estrutural. Por fim, os trabalhos que tratam da aplicação de Dispositivos Baseados em *Inertor* (DBI) na técnica de controle estrutural são apresentados. Nesse capítulo são sugeridos diversos trabalhos sobre cada assunto abordado com a intenção de enriquecer o conhecimento do leitor sobre os trabalhos disponíveis e incentivar sua leitura.

2.1 CONTROLE ESTRUTURAL

Estudos mais aprofundados de técnicas para controlar vibrações possuem origem no campo da engenharia aeroespacial e tratam sobre o estudo do atrito (gerado na atmosfera), na combustão interna e nos pontos de conexão das espaçonaves. Já o uso de técnicas de controle estrutural em edifícios é ainda mais antigo e data o século XVIII. No Japão, em 1885, o professor de engenharia John Milne aplicou rolamentos esféricos nas fundações de uma casa de madeira com objetivo de isolar a estrutura do solo, dessa forma, a casa não receberia toda a energia provida de um abalo sísmico. Foi a primeira evidência do uso da técnica de isolamento de base. Em 1909, o médico Johannes A. Calanteriens desenvolveu um método no qual a edificação era construída em uma fundação sob camadas constituídas de areia, mica e talco, e assim, o edifício deslizaria durante um terremoto, isolando a edificação. Anos mais tarde, os estudos do professor T. Kobori, em 1956, incorporaram o conceito de “Controle automático no projeto resistente a terremotos em estruturas de edifícios”, o qual é considerado a primeira tentativa de formular um problema de controle ativo. Em 1972, J. T. P Yao sugeriu as diretrizes para as pesquisas de controle ativo na engenharia civil e, em 1989, o primeiro edifício com controle ativo foi projetado por T. Kobori na cidade de Tóquio no Japão (Kobori *et al.*, 1991a; b; Villaverde, 1994; Housner *et al.*, 1997b; Soong e Dargush, 1997; Naeim e Kelly, 1999; Spencer Jr e Nagarajaiah, 2003).

De forma geral, as técnicas de controle estrutural são divididas em quatro categorias: controle passivo, controle ativo, controle semiativo e controle híbrido. A Tabela 2.1 resume as

técnicas de controle mais conhecidas dentro das quatro categorias. Em seguida, uma breve descrição de cada categoria é realizada. Destaca-se que os DBI não são incluídos na tabela pois são abordados de forma individual no item 2.2.

Tabela 2.1 – Classificação dos sistemas de controle de vibrações em estruturas.

Tipo de controle	Ação	Dispositivo
Passivo	Absorsores	Amortecedores de massa sintonizada (AMS)
		Amortecedores de líquido sintonizado (ALS)
		Amortecedor de coluna de líquido sintonizado (ACLS)
Passivo	Dissipadores	Amortecedores viscofluídos
		Amortecedores viscoelásticos
		Amortecedores friccionais
	Isoladores	Isolamento de base
Ativo e Híbrido	Efeitos de massa	Amortecedores de massa ativa
		Amortecedores híbridos de massa
		Cabos ativos
	Controle de força	Diagonais ativas
		Atuadores piezoelétricos
Semiativo	Controle de amortecimento	Amortecedores viscosos de orifício variável
		Amortecedores sintonizados líquidos ajustáveis
		Amortecedores magneto-reológicos
	Controle de rigidez	Amortecedores fluidos controláveis
		Amortecedor de fricção variáveis

Fonte: Elaboração própria.

- *Controle passivo*: essa técnica se baseia na utilização de dispositivos que não utilizam fonte externa de energia. Na estrutura são instalados dispositivos que absorvem ou consomem parte da energia de vibração oriunda de excitações externas. Assim, a dissipação de energia na estrutura principal é aliviada. Os dispositivos de controle passivo são os mais utilizados na engenharia civil e tem como principais vantagens a simplicidade e confiabilidade. Uma desvantagem desses dispositivos é que, normalmente, funcionam apenas na faixa de frequência prevista em projeto

- *Controle ativo*: são dispositivos que necessitam de fonte externa de energia, pois aplicam forças para controlar as respostas advindas de forças dinâmicas. Também, é necessário um sistema de aquisição de dados e sensores, visto que as forças são calculadas em tempo real, utilizando algoritmos de controle automático. A vantagem desse tipo de controle é que ele é adaptável a diversos tipos de carregamento, o que não ocorre no controle passivo. Ademais, são normalmente bastante eficientes em comparação a outros tipos de controle. Uma grande desvantagem é a necessidade de energia externa para seu funcionamento, o que pode ser crítico durante a ação de um sismo, por exemplo.
- *Controle semiativo*: são dispositivos que modificam suas propriedades mecânicas internas dependendo da intensidade da excitação externa. É uma solução intermediária entre os dispositivos de controle ativo e passivo. Em relação ao controle ativo, demandam menos energia para seu funcionamento, tornando-se uma solução mais econômica e mais robusta quando comparado ao controle passivo. São conhecidos como sistemas passivos inteligentes, como uma espécie de dispositivo passivo controlável.
- *Controle Híbrido*: é o uso de duas ou mais técnicas em conjunto. Como vantagens, esses sistemas normalmente requerem forças de magnitudes menores nos atuadores. Ainda, trabalham em uma faixa de frequência maiores quando comparado com o controle passivo. Por exemplo, o uso conjunto de um controle ativo e passivo torna-se uma solução viável caso o sistema ativo venha falhar devido à falta de energia, dado que ainda haverá uma parcela de controle proporcionada pelo dispositivo passivo.

Uma vez que esse trabalho emprega dispositivos de controle passivo, será abordado, a seguir, um subitem que trata especificamente desses dispositivos.

2.1.1 Controle Passivo

As técnicas de controle passivo são baseadas na utilização de dispositivos que não utilizam fonte externa de energia. Dentre os diversos dispositivos de controle passivo existentes, pode-se separá-los em três grandes categorias: dispositivos que absorvem energia, os que dissipam energia e os que isolam a estrutura. São dispositivos relativamente simples e de baixo custo, porém, tem parâmetros fixos e normalmente são sintonizados para uma frequência

particular. Os sistemas de controle passivo são os mais utilizados na engenharia civil, assim, são largamente estudados e confiáveis. Além disso, não requerem manutenção permanente e não necessitam de alta tecnologia ou algoritmos complexos para seu funcionamento (Jurukovski *et al.*, 1995; Avila, 2002; Palomera-Arias *et al.*, 2008; Parulekar e Reddy, 2009; Ras e Boumechra, 2016; Elwardany *et al.*, 2022; Lavassani *et al.*, 2023; Mehmandousti e Jalaeefar, 2023).

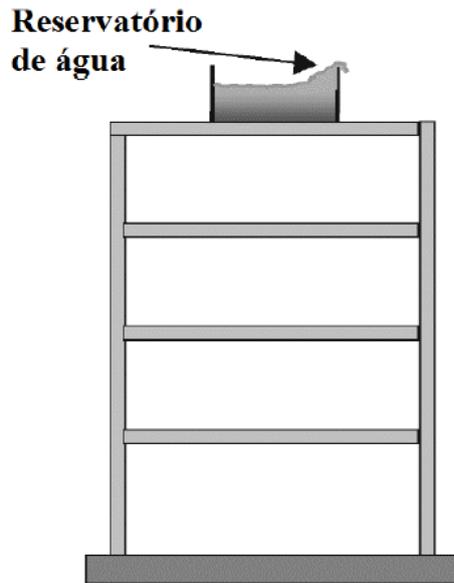
2.1.1.1 Dispositivos absorsores

Essa técnica de controle passivo consiste em adicionar uma massa na estrutura que vibra em uma frequência sintonizada. Essa frequência, normalmente, é sintonizada com a frequência fundamental da estrutura. A concepção de dispositivos absorsores surgiu do projeto de Hermann Frahm, engenheiro naval alemão, que entrou, em 1909 nos Estados Unidos, com um pedido de patente de um dispositivo para amortecer vibrações ressonantes de corpos (navios) sujeitos a certos impactos periódicos (Frahm, 1911). Se a excitação coincide com a frequência natural do absorsor, que é acoplado na estrutura através de um sistema mola-amortecedor, então a estrutura permanece parada, e o dispositivo de controle gera, sempre na estrutura, forças iguais e contrárias à excitação. Os dispositivos mais conhecidos nessa categoria são o AMS, ALS e ACLS, conforme descrito na Tabela 2.1 (Villaverde, 1994; Housner *et al.*, 1997b; Soong e Dargush, 1997; Soto e Adeli, 2013; Etedali e Rakhshani, 2018; Lavassani *et al.*, 2023).

- ALS: Amortecedores de líquidos sintonizados são aqueles em que as características do sistema secundário são fornecidas por um líquido, conforme ilustrado na Figura 2.1. O ALS utiliza a força de interação entre as paredes laterais e o líquido e a quebra de ondas para absorver a energia de vibração (Fei *et al.*, 2019). Esses amortecedores são utilizados desde a década de 50 para estabilizar embarcações marinhas e controlar o movimento oscilante de satélites. A utilização do ALS para controle de vibrações em estruturas foi iniciada por (Bauer, 1984) (Nanda e Biswal, 2014).

Trabalhos detalhados sobre o ALS podem ser vistos em: Banerji (2004), Mondal *et al.* (2014), Ashasi-Sorkhabi *et al.* (2017), Das e Choudhury (2017), Eswaran *et al.* (2017), Tsao e Hwang (2018), Fei *et al.* (2019) e Bitew e Habte (2023).

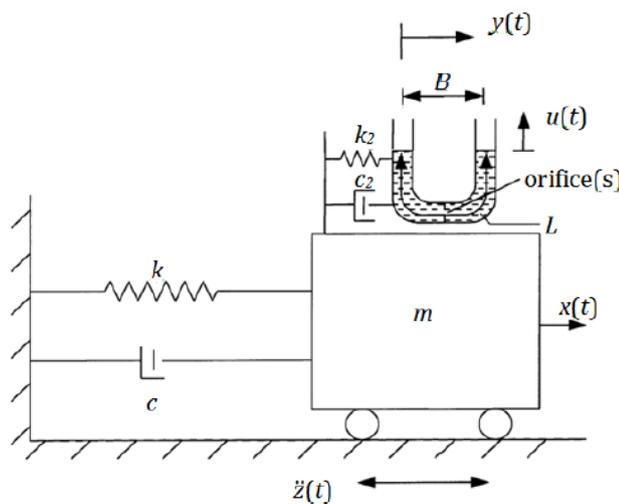
Figura 2.1 – ALS acoplado a um edifício.



Fonte: (Oviedo e Duque, 2006).

- **ACLS:** Amortecedores de coluna de líquido sintonizados foram propostos inicialmente por Sakai (1989), e consistem em um recipiente em forma de “U” contendo um líquido, normalmente água, que tem uma frequência de oscilação e um orifício na parte horizontal, que causa perda de carga, conforme indicado na Figura 2.2. A energia no disposto é dissipada através da combinação da ação que envolve o movimento do líquido, a força restaurada causada pela gravidade, e a força de amortecimento devido à perda de carga (Chakraborty *et al.*, 2012; Espinoza *et al.*, 2018; Fei *et al.*, 2019).

Figura 2.2 – Esquema de um ACLS.

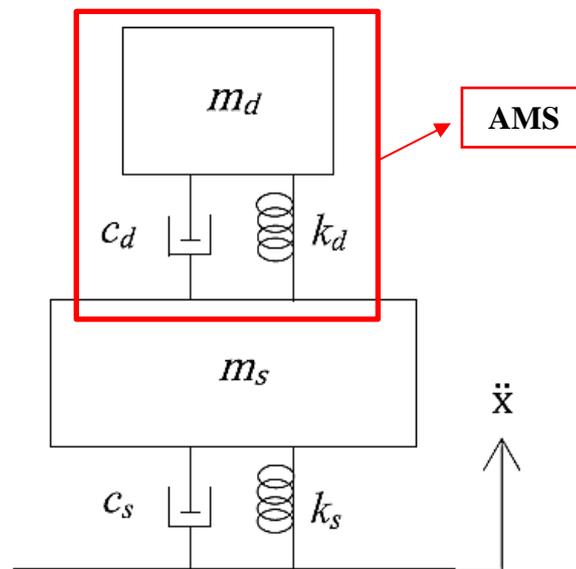


Fonte: (Nguyen e Pham, 2019).

Mais trabalhos sobre a performance do ACLS e dispositivos derivados, podem ser vistos em: Xu *et al.* (1992), Balendra *et al.* (1995), Haroun *et al.* (1996), Gao *et al.* (1997), Won *et al.* (1997), Gao *et al.* (1999), Chang e Hsu (1998), Shum (2009), Bigdeli e Kim (2015), Bigdeli e Kim (2016), Rozas *et al.* (2016), Freitas e Pedroso (2019), Nguyen e Pham (2019), Mendes *et al.* (2023) e Xiao *et al.* (2023).

- AMS: Os amortecedores de massa sintonizado são os mais empregados como dispositivos absorvedores em edifícios. Uma das aplicações mais conhecidas desses dispositivos é no edifício *Taipei 101*, localizado em Taipei, *Taiwan*. O AMS consiste em um sistema massa, mola e amortecedor que é conectado na estrutura, conforme ilustrado na Figura 2.3. A frequência do AMS é sintonizada para uma frequência particular da estrutura, dessa forma, quando a estrutura é excitada, parte da energia de vibração é transferida para o amortecedor, que vibra fora de fase com a estrutura (Li *et al.*, 2011; Elias e Matsagar, 2017; Bagheri e Rahmani-Dabbagh, 2018).

Figura 2.3 – Sistema de um grau de liberdade com um AMS.



Fonte: (Soto e Adeli, 2013).

Villaverde (1994) elucidou que as principais vantagens de um AMS são sua facilidade de construção e o pouco impacto que causa na estrutura. Também, não requerem fonte externa de energia, respondem a pequenas excitações, requerem pouca manutenção e suas propriedades podem ser modificadas facilmente. Em seu trabalho, o autor realizou estudos numéricos e experimentais, utilizando diversos modelos de edifícios e um modelo de ponte estaiada. As principais conclusões dizem respeito a escolha dos valores de massa, rigidez e amortecimento

do AMS. Foi observada a importância da determinação desses parâmetros na performance do amortecedor para uma adequada redução das vibrações.

Wang *et al.* (2001) estudaram a aplicação de um AMS em edifícios altos sujeitos a excitações sísmicas. Os autores utilizaram um modelo de viga de Euler não-linear e um modelo de viga com flexão simples para modelar o edifício e um AMS instalado em seu topo, ligado à estrutura através de uma mola. A frequência do AMS foi sintonizada para ser idêntica a primeira frequência do edifício. Foi relatado que a frequência do AMS era muito próxima à frequência da estrutura, porém, não era igual, o que diminuiu a eficiência do amortecedor. Se considerado o atrito seco, a mitigação das vibrações se torna mais efetiva. Por fim, foi verificado que o deslocamento do AMS era maior que o deslocamento do pavimento do topo, o que demonstra que esse amortecedor necessita de mais espaço para operar em situações reais.

Kang *et al.* (2012) investigaram a performance de um AMS instalado em um edifício real de aço com 39 pavimentos, sujeito a ação de tufões. Os autores utilizaram a identificação de sistemas para produzir o modelo computacional do edifício. Com o modelo computacional, puderam estimar a resposta do edifício sem o AMS. Comparado com o sistema não controlado, o AMS reduz o pico de aceleração em torno de 48 % e a aceleração RMS em 59 %.

Etedali e Rakhshani (2018) realizaram um estudo de otimização em busca dos parâmetros ótimos de um AMS para um edifício sujeito a ação sísmica. Foi aplicada uma otimização multiobjetiva chamada *Cuckoo search*. Os objetivos da otimização eram reduzir simultaneamente a resposta sísmica da estrutura em termos de deslocamento e aceleração e sintonizar o AMS com a menor razão de massa. Para isso dois modelos foram utilizados. O primeiro modelo é do tipo linear *shear frame* com 10 pavimentos de igual massa, sendo sua primeira frequência natural de 1,01 Hz, sendo submetido a uma excitação de ruído branco com filtro. Foi constatado que a frequência ótima do AMS não depende da frequência predominante da excitação, porém a razão de amortecimento é levemente sensível, sendo menor quanto maior essa frequência. Utilizando os registros de aceleração do sismo de El Centro, foram obtidas reduções na ordem de 32 % para o deslocamento máximo do topo e acelerações. O segundo modelo é um linear *shear frame* com 10 pavimentos, porém a massa e a rigidez de cada andar são distintas, e frequência fundamental é 0,51 Hz. As mesmas conclusões do primeiro modelo são obtidas. As reduções de deslocamento foram na ordem de 26 % e das acelerações de 32 %.

De Domenico *et al.* (2022) estudaram a obtenção dos parâmetros ótimos de um AMS com histerese comprimida (AMS-HC). É proposta uma otimização baseada em estocástica. A

ação externa na base foi modelada como um processo aleatório não-estacionário com o filtro de Kanai-Tajimi proposto por Clough e Penzien (2003). Três funções objetivo foram consideradas com objetivo de aplicar diferentes filosofias. Uma das funções é baseada em deslocamento, a outra função em aceleração e, por fim, uma função baseada em energia. Os autores demonstraram que a abordagem estocástica aplicada é viável para a otimização dos AMS-HC, alcançando reduções de até 40 % no deslocamento relativo entre pavimentos do modelo do edifício de 20 pavimentos em que o dispositivo foi alocado.

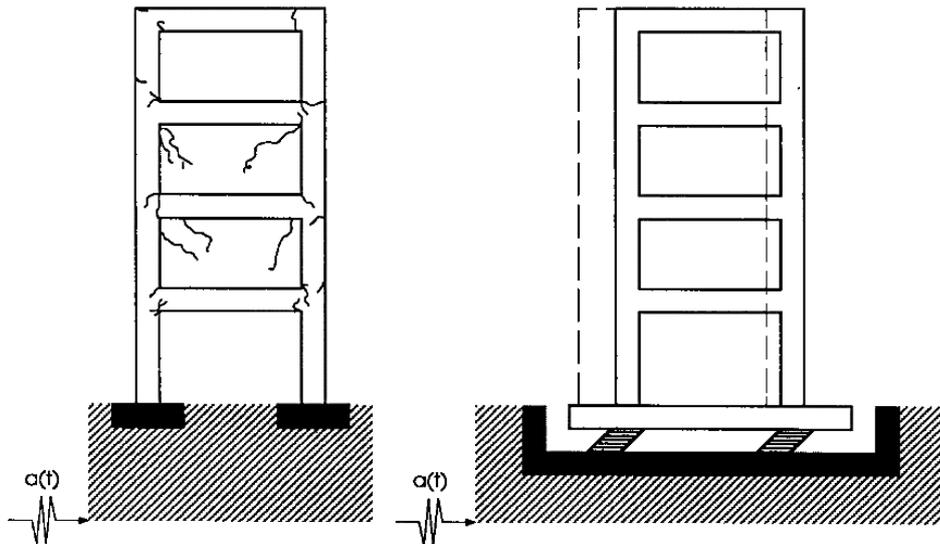
Diversos dispositivos derivados do AMS foram desenvolvidos ao longo do tempo. Por exemplo, o amortecedor de massa sintonizado múltiplo (AMSM) e o AMS bidirecional. Mais estudos relevantes sobre o AMS podem ser vistos em: Warburton (1982), Tsai e Lin (1993), Wong e Harris (2012), (2014), Farzampour e Asl (2017), Sakr (2017), Love e Lee (2018), Elias *et al.* (2019), Ghassempour *et al.* (2019), Miguel e Dos Santos (2021), Rezende *et al.* (2021), Rossato e Miguel (2021), Brandao *et al.* (2022), Miguel *et al.* (2022), Ontiveros-Perez e Miguel (2022), Khalid e Bansal (2023), Lai *et al.* (2023), Miguel e De Souza (2023), Mubuli *et al.* (2023) e Yang *et al.* (2023).

2.1.1.2 Dispositivos isoladores

A concepção dessa técnica de controle passivo é desacoplar o edifício da ação de um abalo sísmico, através de dispositivos com baixa rigidez horizontal como rolamentos, bolas, cabos e areia. O primeiro registro moderno dessa técnica é atribuído a J. A. Calanterients, em 1909, um médico inglês, que entrou em contato com o serviço sismológico de Santiago no Chile, na qual, descreveu um novo método de construção de edifícios em que a ação do terremoto perderia significância devido à existência de uma junta livre lubrificada. Essa junta era formada por camadas de areia fina, mica ou talco, o que levaria o edifício a deslizar em um terremoto, reduzindo as forças transmitidas a ele. Na Figura 2.4 apresenta-se um edifício sem e com o uso de isolamento de base durante um terremoto (Barbat e Bozzo, 1997; Naeim e Kelly, 1999).

Os sistemas de isolamento de base são largamente utilizados e possuem uma extensa bibliografia, pode-se citar: Fan *et al.* (1991), Kelly (1999), Dolce *et al.* (2000), Komodromos *et al.* (2007), Tsang (2008), Cutfield *et al.* (2014), Ryan *et al.* (2018), Makris (2019), Yang *et al.* (2019), Abed *et al.* (2022), Egbelakin *et al.* (2022), Jung *et al.* (2022) e Wang, Shen, Zhu e Luo (2023).

Figura 2.4 – Edifício com base fixa convencional (à esquerda) e com a base isolada (à direita).



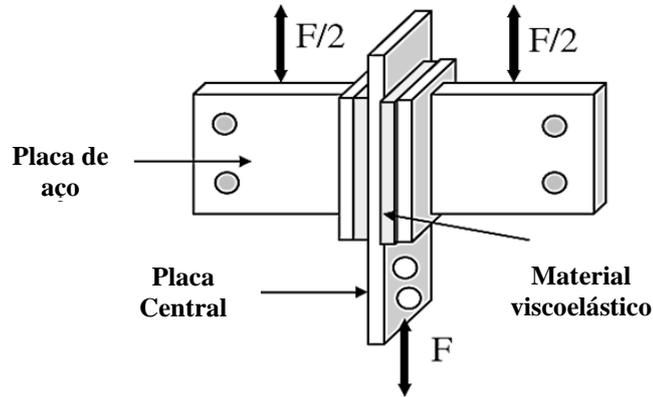
Fonte: (Barbat e Bozzo, 1997).

2.1.1.3 Dispositivos dissipadores

Esses dispositivos dissipam energia durante o processo de deformação plástica, transformando energia mecânica em calor. Essencialmente, esse método aumenta a capacidade de dissipação de energia da estrutura em que ele está inserido. Dessa forma, limitam as deformações prejudiciais nos componentes da estrutura. Como exemplo desses dispositivos, pode-se citar: amortecedores viscofluídos, amortecedores viscoelásticos, amortecedores de fricção e amortecedores metálicos (Symans *et al.*, 2008; Parulekar e Reddy, 2009).

- Amortecedores viscoelásticos: são dispositivos que podem ser construídos, por exemplo, por elementos rígidos unidos por um material viscoelástico, conforme ilustrado na Figura 2.5. O princípio de funcionamento é dado pela deformação por cisalhamento desse componente. A energia de dissipação é maior que a deformação longitudinal do material. Esses amortecedores foram introduzidos por Mahmoodi (1969), o qual realizou um estudo analítico extenso e investigações experimentais. A primeira utilização de amortecedores viscoelásticos na engenharia civil se deu nas antigas torres gêmeas do *World Trade Center* em Nova Iorque, na década de 70. Naquela ocasião, foram introduzidos 10.000 amortecedores a fim de auxiliar as torres no controle das vibrações em razão da ação do vento. É importante destacar que o comportamento do material viscoelástico é altamente dependente das frequências das vibrações, tensões e temperatura.

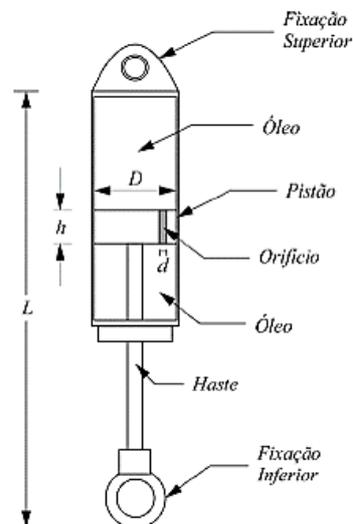
Figura 2.5 – Amortecedor viscoelástico.



Fonte: (Parulekar e Reddy, 2009).

- Amortecedores viscofluídos: são baseados no princípio do fluxo de um fluido em alta velocidade através de um orifício. Esses dispositivos dissipam energia convertendo energia mecânica em energia térmica através de um fluido viscoso, como silicone ou óleo, que liga um pistão cilíndrico, conforme ilustrado na Figura 2.6. Diferentemente dos amortecedores viscoelásticos, os amortecedores viscofluídos trabalham linearmente em uma grande faixa de frequência, e não são intensamente atingidos pela temperatura. Também, são capazes de gerar forças fora de fase com o deslocamento. Inicialmente, foram introduzidos por Makris e Constantinou (1990), no qual aplicou esses dispositivos como contraventamentos com a finalidade de atenuar a resposta sísmica de estruturas. Uma aplicação prática é nas torres gêmeas Petronas na Malásia em 1995, na qual, utilizam 12 amortecedores.

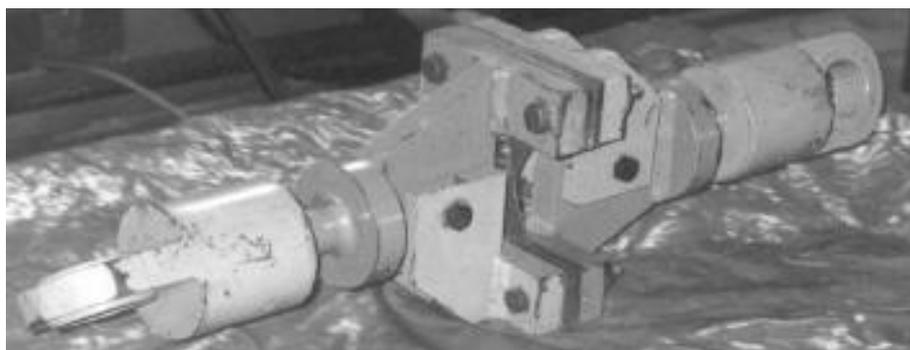
Figura 2.6 – Amortecedor viscofluído.



Fonte: (Peña, 2017).

- Amortecedores metálicos: fazem uso da capacidade de deformação inelástica dos metais, dissipando a energia de vibração durante um terremoto. Foram apresentados, inicialmente por Kelly *et al.* (1972). Na Figura 2.7 é possível visualizar um amortecedor de escoamento metálico. Esses amortecedores são conhecidos por serem práticos, e podem ser instalados em pilares, paredes e vigas, pois utilizam a deformação relativa entre os elementos da estrutura principal e dissipam parte da energia de vibração.

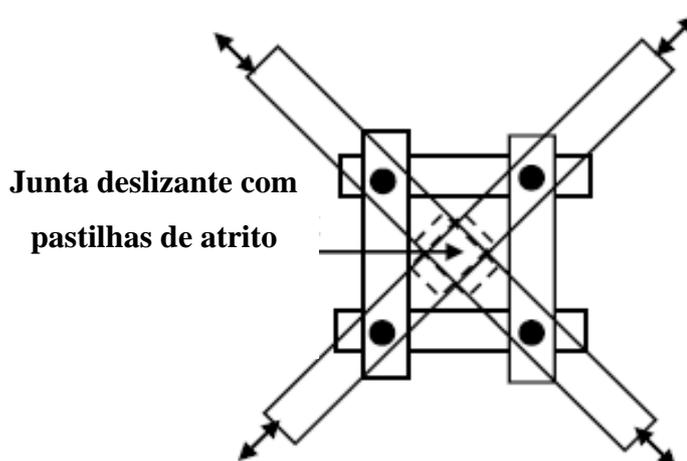
Figura 2.7 – Amortecedor de escoamento metálico.



Fonte: (Parulekar e Reddy, 2009).

- Amortecedores de fricção: esses dispositivos utilizam do atrito entre dois elementos sólidos para dissipar energia de vibração. Foram desenvolvidos, inicialmente, por Pall *et al.* (1980) e consistem em placas de aço tratadas para desenvolverem um atrito mais confiável e presas com parafusos de alta resistência, conforme ilustrado na Figura 2.8. Esses dispositivos são afetados pela frequência, pela amplitude da carga e pelo número de ciclos de carregamento. Todavia, a força de deslizamento deve ser cuidadosamente escolhida para uma energia de dissipação adequada.

Figura 2.8 – Amortecedor de fricção.



Fonte: (Parulekar e Reddy, 2009).

O campo da engenharia de controle estrutural se desenvolve mais a cada dia. O surgimento de novos materiais e técnicas ascenderam os campos de aplicação e moldaram novos usos para as técnicas de controle. Um exemplo dessa afirmação são os estudos de Shen *et al.* (2015), nos quais testaram três dispositivos de controle distintos em uma ponte com objetivo de manter os seus componentes em regime elástico, quando submetida a um abalo sísmico. A melhor capacidade de dissipação de energia foi obtida por amortecedores viscofluídos, que reduziram a amplitude de vibração em 40 %.

Ras e Boumechra (2016) aplicaram amortecedores viscofluídos (AVF) em um edifício com 20 pavimentos, em forma de contraventamentos. O uso dos AVF reduziu significativamente as respostas dinâmicas do edifício. Foi possível obter reduções de até 32 % no deslocamento relativo entre pavimentos. Foram alcançadas atenuações de 37 % nas acelerações, reduzindo o cisalhamento na base. Também, forças axiais indesejadas não são transmitidas devido ao contraventamento com AVF.

Azarsa *et al.* (2016) utilizaram AVF para limitar os esforços dinâmicos de estruturas sob ação sísmica. Foi estudado um edifício de aço com 4 pavimentos contraventado. O modelo da estrutura tridimensional foi desenvolvido via Elementos Finitos. Uma boa performance na atenuação das respostas foi obtida com o uso dos AVF como contraventamento do edifício. É possível reduzir o cisalhamento na base, deslocamento no topo e deslocamento relativo entre pavimentos. Foram obtidas reduções de até 80 % no deslocamento no topo, comparado com o sistema sem contraventamento. Os deslocamentos relativos entre pavimento sofreram atenuações de até 41%.

Hajmoosa e Mansoorghenaei (2017) empregaram amortecedores viscofluídos e viscoelásticos para redução da resposta sísmica em edifícios. Em seus estudos, ressaltaram as vantagens desses amortecedores, pois reduzem o dano estrutural e não-estrutural. Além de serem dispositivos de fácil instalação, não impactam o projeto de fundação, pois são leves quando comparado ao peso total da estrutura. Por sua vez, essa característica possibilita sua utilização em edifícios já construídos. São também eficazes em estruturas flexíveis que podem sofrer grandes deformações. Atenuações de 45 % no momento fletor e 50 % no esforço cortante foram alcançadas. O deslocamento máximo de topo reduziu pela metade e o cisalhamento da base diminuiu em torno de 40 %.

De Domenico e Ricciardi (2019) utilizaram a abordagem estocástica baseada em energia com objetivo de otimizar os parâmetros de AVF não-lineares para proteção sísmica de

estruturas. O processo de ruído branco gaussiano Kanai-Tajimi com filtro foi adotado para caracterizar o conteúdo de frequências do sismo. Foi possível concluir que a otimização baseada em energia é uma perspectiva significativa para sistemas passivos de dissipação de energia. Também, a ação sísmica foi considerada estacionária, o que é aceitável uma vez que os problemas de otimização são, normalmente, focados na fase firme do movimento.

Outros estudos recentes sobre dispositivos dissipadores podem ser vistos em: Miguel (2002), Hatzigeorgiou e Pnevmatikos (2014), Miguel *et al.* (2016a), Miguel *et al.* (2016b), Palermo *et al.* (2017), Aghlara e Tahir (2018), Losanno *et al.* (2018), Miguel e Lopez (2018), Aydin *et al.* (2019), Ismail (2019), Lo Feudo *et al.* (2019), Milanchian e Hosseini (2019), Nabid *et al.* (2019), Li *et al.* (2022) e Zhang, Y. L. *et al.* (2023).

Os sistemas de controle passivo são econômicos, confiáveis e não necessitam de fontes de energia externa. Também, sua formulação em problemas dinâmicos é mais simples. São os sistemas de controle mais utilizados no controle de vibrações em edifícios (Ali e Moon, 2007). Uma grande desvantagem desse sistema é que normalmente funcionam para uma faixa de frequência restrita. São recomendados os trabalhos de Sarwar e Sarwar (2019), Yanik e Aldemir (2019), Ikeda *et al.* (2019) e Kavyashree *et al.* (2021), que tratam de estratégias de controle recentes.

Os dispositivos baseados em *inertor* (DBI) são sistemas de controle passivo que vem sendo largamente estudados e aperfeiçoados. Diversos estudos comprovam a eficiência desses dispositivos em moderar as desvantagens dos dispositivos de controle passivo. Assim, no próximo item uma revisão detalhada é efetuada, a fim de apresentar as vantagens desses dispositivos.

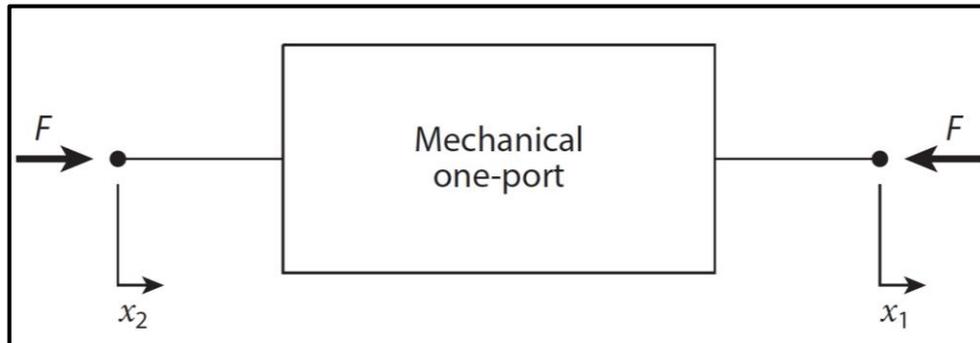
2.2 DISPOSITIVOS BASEADOS EM *INERTER*

O surgimento do elemento *inertor* ocorreu no início dos anos 2000 quando Smith (2002) definiu o termo *inertor* como um dispositivo mecânico com dois nós (dois terminais) e uma porta que possui a propriedade de que a força, igual e oposta, aplicada nos nós é proporcional à aceleração relativa entre os terminais. A equação de um *inertor* ideal é dada por:

$$F = b(\ddot{x}_2 - \ddot{x}_1) \quad (2.1)$$

Em que: F é a força aplicada nos terminais; b é chamado de inertância com unidades de quilogramas, \ddot{x}_1 e \ddot{x}_2 são as acelerações em cada terminal. Na Figura 2.9 é possível observar um esquema do elemento mecânico de uma porta (*mechanical one-port*).

Figura 2.9 – Elemento *inert*.

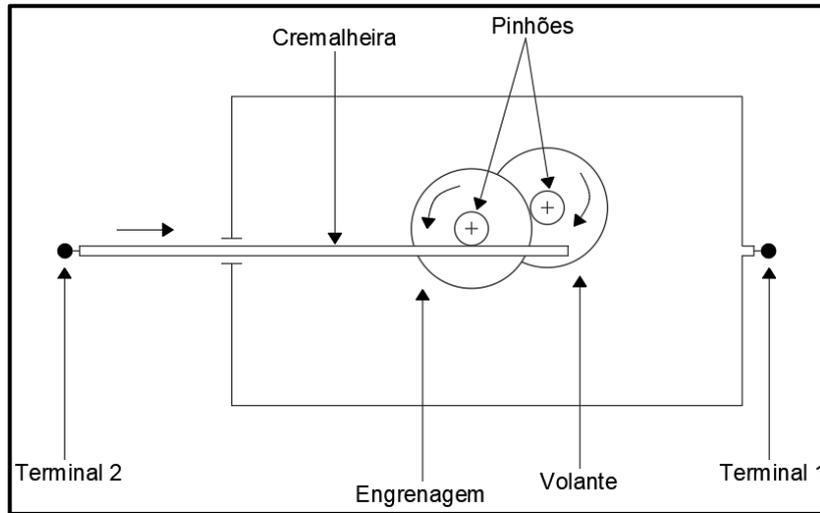


Fonte: (Smith, 2020).

O *inert* permitiu que os circuitos elétricos fossem traduzidos em circuitos mecânicos de maneira totalmente análoga. Também, os dispositivos baseados em *inert* fornecem uma quantidade significativa de massa equivalente enquanto possuem um tamanho reduzido e uma massa pequena, dessa forma, demonstram-se eficientes no controle de vibrações (Madhamshetty e Manimala, 2018). Os modelos físicos de *inert*, em sua forma mais simples, são os seguintes: cremalheira e pinhão (*rack-and-pinion*), fuso de esfera (*ball-screw*) e hidráulicos (Smith e Wang, 2004; Papageorgiou e Smith, 2005; Evangelou *et al.*, 2006; Papageorgiou *et al.*, 2008; Wang *et al.*, 2011; Wang e Wu, 2016; Basili *et al.*, 2018; Chen *et al.*, 2019).

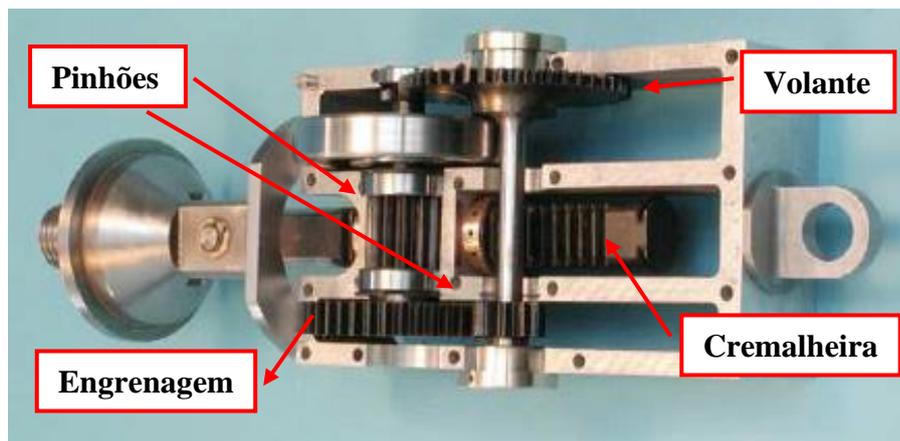
- Dispositivo *inert* *rack-and-pinion*: A primeira proposta para um mecanismo do tipo *rack-and-pinion* para o *inert* foi desenvolvida por Smith (2002), e está apresentado na Figura 2.10. Um ano antes, Smith registrou a patente para esse mecanismo juntamente com a do dispositivo do tipo *ball-screw*. Na Figura 2.11 é possível visualizar o protótipo desenvolvido na Universidade de Cambridge. Nesse dispositivo a força parte da cremalheira, que atua no terminal 2, passando pelo pinhão até a engrenagem, e, depois, até o volante.

Figura 2.10 – Modelo mecânico esquemático de um *inertor rack-and-pinion*



Fonte: (Smith, 2002).

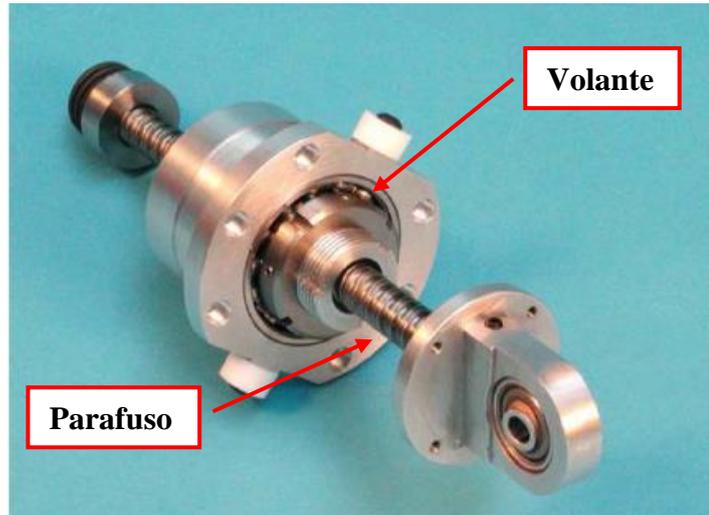
Figura 2.11 – Protótipo de um *inerte rack-and-pinion*.



Fonte: (Smith e Wang, 2004).

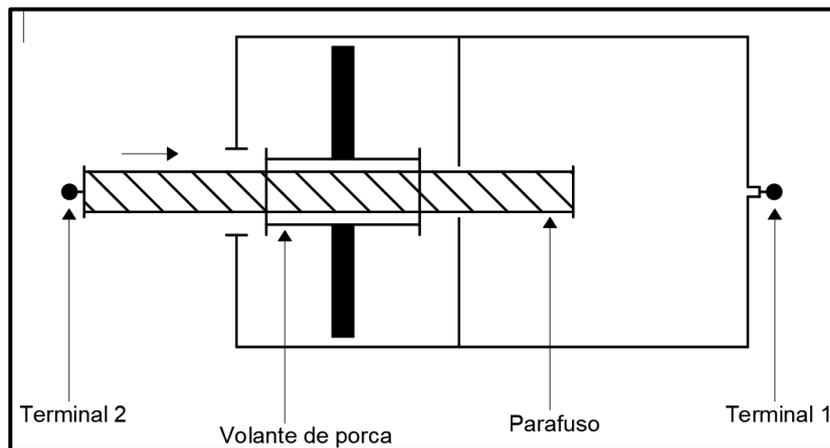
- Dispositivo *inerte ball-screw*: Nesses dispositivos o movimento linear do parafuso é diretamente convertido em movimento rotacional do volante (Papageorgiou *et al.*, 2009; Madhamshetty e Manimala, 2018). Na Figura 2.12 está apresentada uma imagem de um protótipo construído também na universidade de Cambridge. Na Figura 2.13 um desenho esquemático desse dispositivo é ilustrado.

Figura 2.12 – Protótipo de um *inertor ball-screw*.



Fonte: (Papageorgiou *et al.*, 2009).

Figura 2.13 – Modelo mecânico esquemático de um *inertor ball-screw*.

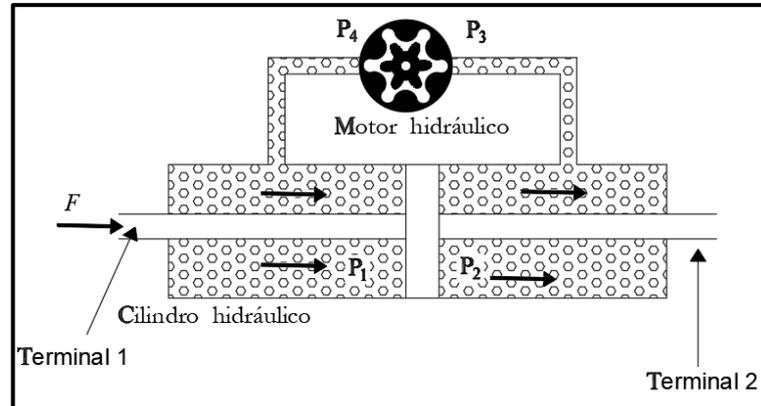


Fonte: Elaboração própria.

- Dispositivo *inertor* hidráulico: Inicialmente foi apresentado em Smith (2008), em que sugeriu o uso de uma bomba de engrenagem para converter movimentos lineares em rotacionais. Wang *et al.* (2011) aplicaram um motor de engrenagem para construir um *inertor* hidráulico, no qual pode integrar efeitos de amortecimento para simplificar o projeto do sistema. Na Figura 2.14 está ilustrado um desenho esquemático de um *inertor* hidráulico. Nesses dispositivos é importante o entendimento dos efeitos de amortecimento, compressão e atrito do fluido utilizado. Os registros de patente: Smith *et al.* (2012), Smith *et al.* (2014) e Gartner e Smith (2015) relatam dispositivos *inertor* hidráulicos que aplicam o fluxo de líquido para gerar uma força inercial em razão da massa do líquido com objetivo de controlar as forças mecânicas. O fluido circula através de um canal helicoidal para produzir a inércia. Um desenho esquemático está

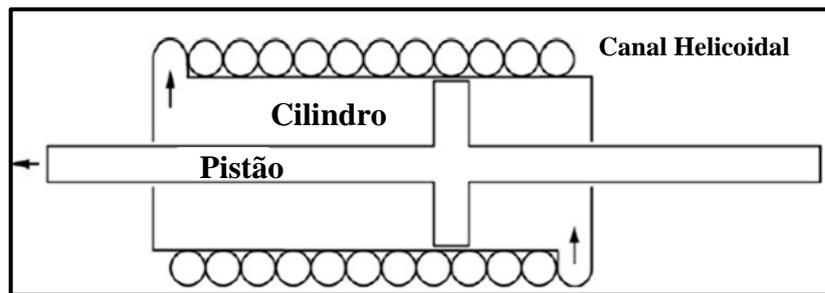
apresentado na Figura 2.15. Nakaminami *et al.* (2017) realizaram ensaios experimentais em um dispositivo *inertor* hidráulico em escala real para proteção sísmica de estruturas.

Figura 2.14 – Princípio de funcionamento de um *inertor* hidráulico.



Fonte: (Wang *et al.*, 2011).

Figura 2.15 – *Inertor* hidráulico de hélice externa.



Fonte: (Smith *et al.*, 2012).

Estudos experimentais primários com dispositivos *inertor* destacam a capacidade desse mecanismo de, mesmo com massa e dimensões reduzidas, gerar uma massa fictícia elevada (Papageorgiou e Smith, 2005; Papageorgiou *et al.*, 2009). Por exemplo, um dispositivo de 3,50 kg (massa estática) é capaz de gerar uma massa fictícia ou massa dinâmica de 700 kg. Com um dispositivo *ball-screw* de 1,00 kg de massa estática, foram obtidos 50, 130 e 230 kg de massa dinâmica, apenas modificando o tamanho do seu volante.

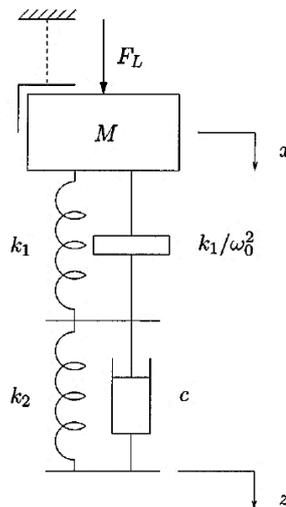
Experimentalmente, Smith e Wang (2004) testaram um protótipo de dispositivo *inertor rack-and-pinion* e, numericamente, empregaram em um modelo de suspensão para veículos. As suspensões foram desenvolvidas com elementos de mola, amortecedor e *inertor*. Os autores obtiveram uma inertância de 726 kg com um volante de apenas 0,225 kg de massa física. Em comparação com suspensões comuns, melhorias de 10 % ou mais foram obtidas com o auxílio do elemento *inertor*. Também, os resultados demonstram uma propriedade característica de avanço de fase com o elemento *inertor*, a qual não é obtida com suspensões convencionais que contém apenas molas e amortecedores.

Estudos da aplicação do elemento *inertor* em sistemas de controle foram amplamente realizados em diversas áreas da engenharia. Esses mecanismos são chamados de dispositivos baseados em *inertor* (DBI). A primeira aplicação real foi cometida em um sistema mecânico de suspensão em carros de corrida da Fórmula 1, chamado de “*J-damper*” (Chen *et al.*, 2009). Em outras áreas de estudo, destaca-se:

- Suspensão de veículos: Papageorgiou e Smith (2006), Wang e Su (2008), Kuznetsov *et al.* (2011), Chen, M. Z. Q. *et al.* (2014), Hu *et al.* (2014), Sun *et al.* (2016), Shen *et al.* (2017), Afshar *et al.* (2023), Ge *et al.* (2023) e Soong *et al.* (2023).
- Amortecedores de direção em motocicletas de alta performance: Evangelou *et al.* (2004), Evangelou *et al.* (2006) e Sharma e Limebeer (2012).
- Suspensão em trens: Wang *et al.* (2006), Wang *et al.* (2009), Wang e Liao (2010), Jiang *et al.* (2012), Chen, H. J. *et al.* (2014), Chen, H. J. *et al.* (2017), Pan *et al.* (2018), Wang *et al.* (2022) e Zhang, X. X. *et al.* (2023).
- Trem de pouso de aviões: Dong *et al.* (2015), Liu *et al.* (2015), Li *et al.* (2017) e Zhang *et al.* (2018).

O emprego de DBI no controle de vibrações de edifícios foi, inicialmente, estudado pelo seu próprio idealizador, M.C. Smith. Smith (2002) sugeriu um sistema mecânico *inertor*-mola-amortecedor que conecta uma massa M de uma estrutura (Figura 2.16).

Figura 2.16 – Modelo de controle de vibrações proposto por Smith (2002).



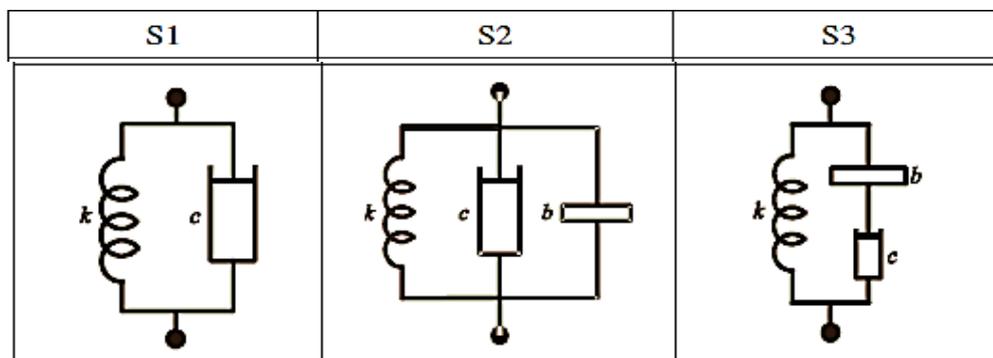
Fonte: (Smith, 2002).

Quando comparado com um amortecedor de massa sintonizado (AMS), uma das vantagens do uso de DBI é a pouca necessidade de acrescentar massa à estrutura, além de não apresentar possíveis limitações de deslocamento dessa massa.

Com as vantagens de aplicação do elemento *inertor* em carros, motos, aviões e trens, conforme citado, Fu-Cheng *et al.* (2007) propuseram um sistema de isolamento de base com DBI em um edifício. Os dispositivos foram instalados na direção vertical e horizontal, sendo aplicadas três configurações, conforme ilustrado na Figura 2.17. É importante destacar que a configuração S1 é característica de um amortecedor viscoelástico e foi usada para comparar com as configurações S2 e S3, que possuem *inertor*. Foram observadas melhorias em torno de 60 % para as configurações S2 e S3, na direção vertical. Na direção horizontal houve melhoria de desempenho de 100 % na configuração S3. Resultados similares foram encontrados por Wang *et al.* (2010).

Outros trabalhos sobre a aplicação de DBI na técnica de isolamento de base podem ser vistos em: Alujević *et al.* (2018), De domenico e Ricciardi (2018), Zhao *et al.* (2019), Masnata *et al.* (2020), Li *et al.* (2021), Chen *et al.* (2023) e Wang, Shen, Zhu, *et al.* (2023).

Figura 2.17 – Modelos de isolamento de base estudados.

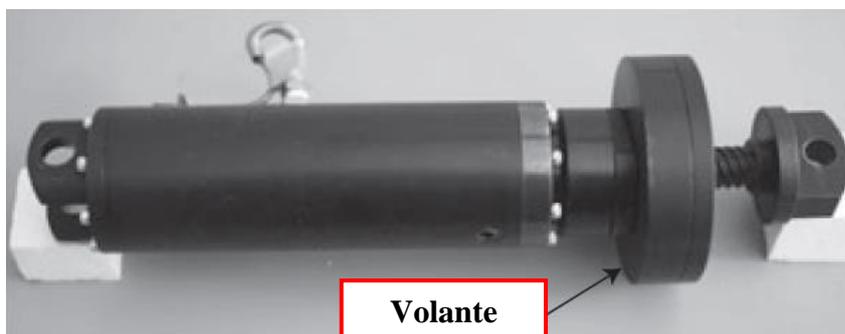


Fonte: (Fu-Cheng *et al.*, 2007).

Ikago *et al.* (2012) propuseram um dispositivo conhecido como amortecedor viscoso de massa sintonizado (AVMS). Nesse dispositivo, a força inercial é gerada pela aceleração absoluta e não pela aceleração relativa, como os DBI clássicos. O AVMS consiste em um amortecedor de massa viscoso (AVM) com uma massa rotacional, em que seu efeito é amplificado por um dispositivo *ball-screw*, e uma mola que conectada ela à estrutura. Foi realizada uma comparação do AVMS com amortecedor viscoso (AV) e o AVM, além de ensaios experimentais em uma mesa vibratória. O dispositivo *ball-screw* utilizado experimentalmente está apresentado na Figura 2.18. Os resultados indicaram que o AVMS tem

uma melhor performance em reduzir a resposta para excitações harmônicas quando comparado ao AV e AVM. No estudo experimental foi possível obter 350 kg de massa dinâmica com apenas 2 kg de massa estática. Por fim, para entender melhor o comportamento do AVMS frente a excitações sísmicas, foram empregados movimentos sísmicos de período longo e um sismo sintetizado com uma grande faixa de componentes de frequência. Com o sismo de período longo e o sismo sintetizado, houve reduções na performance do AVMS, porém, ainda foi mais efetivo que os outros dois amortecedores estudados.

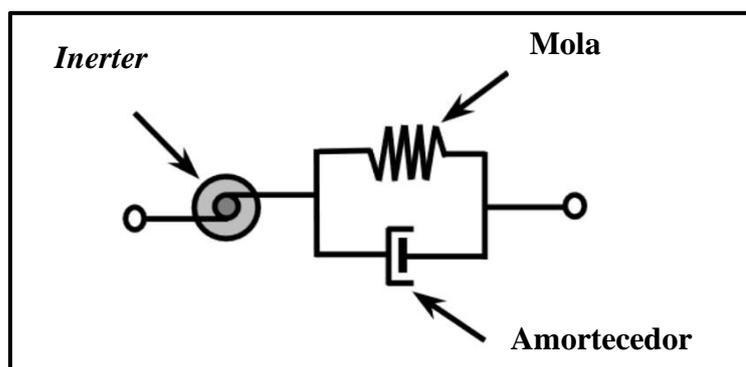
Figura 2.18 – Modelo experimental *ball-screw*.



Fonte: Ikago *et al.* (2012).

Lazar *et al.* (2014) apresentaram um DBI com característica similar a um amortecedor de massa sintonizado (AMS). Foi denominado como amortecedor *inertor* sintonizado (AIS). Nesse dispositivo, o elemento *inertor* é instalado em série com elementos de mola e amortecedor. Na Figura 2.19 está ilustrado o modelo mecânico de um AIS.

Figura 2.19 – Modelo mecânico do AIS.



Fonte: Elaboração própria.

Nesse trabalho pioneiro, o dispositivo AIS é instalado entre os pavimentos da estrutura. Foi verificado que instalar o AIS no andar inferior, conectado ao solo, é mais eficiente no controle das respostas dinâmicas que o instalar no andar superior. Por sua vez, isso representa uma vantagem em relação aos AMS, pois a estrutura não precisará suportar um grande peso

adicional advindo do amortecedor. Em conclusão, foi constatado que embora a performance do AIS e do AMS sejam parecidas, a massa requerida pelo AIS é significativamente menor. Também, o AIS demonstrou-se eficiente na redução das respostas para modos mais altos, mesmo que sintonizado para a primeira frequência.

Um ano após, Lazar *et al.* (2015) estudaram a aplicação do AIS na supressão da vibração em cabos, como uma alternativa aos amortecedores viscofluídos (AV). Foi demonstrado que o AIS é uma alternativa promissora no controle de vibrações, apresentando melhor desempenho que os AV.

Wen *et al.* (2017) compararam o desempenho do AIS e do AVMS, dois DBI, e do amortecedor viscofluído (AV) e amortecedor de massa viscofluído (AVM) no controle das respostas sísmicas em estruturas com múltiplos graus de liberdade (MGDL). Foi observado que o AIS e AVMS podem atenuar significativamente as respostas ressonantes em razão de seu grande amortecimento. Os DBI reduzem de forma mais efetiva os deslocamentos máximos e as respostas de *root mean square* (rms) dos deslocamentos e acelerações.

Wen *et al.* (2022) investigam um método de otimização generalizado dos parâmetros e localização de dispositivos AIS em estruturas MGDL sujeitas a uma excitação estocástica. A solicitação na base é modelada como um ruído branco com filtro. Foi empregado um processo aleatório estacionário gaussiano com média zero, descrito através do modelo de densidade espectral de potência de Kanai-Tajimi com filtro. Foi constatado que a otimização proposta alcança um desempenho de 4 % a 10 % maior na redução das respostas rms de deslocamento relativo entre pavimentos máximo, quando comparado a uma otimização local.

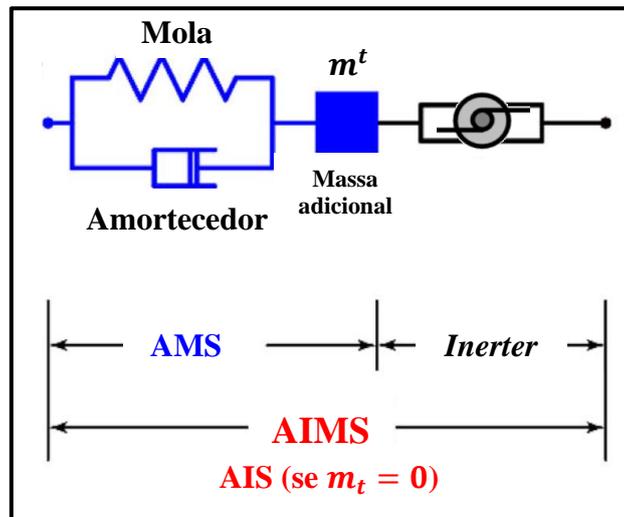
He *et al.* (2023) estudaram o efeito de aperfeiçoamento da razão de amortecimento provido pelo AIS. Os autores propuseram equações para maximizar esse efeito e garantir a eficiência ótima para sistemas de proteção sísmica em edifícios. No trabalho, é constatado que o AIS é eficiente no controle da resposta sísmica de estruturas, principalmente em razão do seu desempenho em suprimir a energia de entrada do sistema. Também, as equações propostas foram eficazes na obtenção dos parâmetros ótimos para o sistema de proteção.

Outros estudos sobre AIS podem ser encontrados em: Lazar *et al.* (2016), Gonzalez-Buelga *et al.* (2017), Sun *et al.* (2017), De De Domenico *et al.* (2018), Radu *et al.* (2019), Wen e Hui (2022), Zhang *et al.* (2022), Alotta *et al.* (2023), Da Costa (2023) e Hao *et al.* (2023).

Marian e Giaralis (2013) desenvolveram um dispositivo conhecido como amortecedor *inertor* de massa sintonizado (AIMS) para proteção sísmica de estruturas. Posteriormente,

Marian e Giaralis (2014) demonstraram que o AIMS era capaz de apresentar uma eficiência superior ao clássico AMS. O objetivo desse estudo de 2014 foi explorar o efeito de amplificação de massa do elemento *inertor* em comparação com o AMS clássico. Utilizando um modelo de um grau de liberdade foi verificado que a incorporação de um elemento *inertor* a um AMS é mais efetivo para razões de massa menores entre o AMS e a estrutura. Na Figura 2.20 está apresentado o modelo mecânico de um AIMS. Repara-se que o AIS é um caso particular do AIMS.

Figura 2.20 – Modelo mecânico do AIMS.



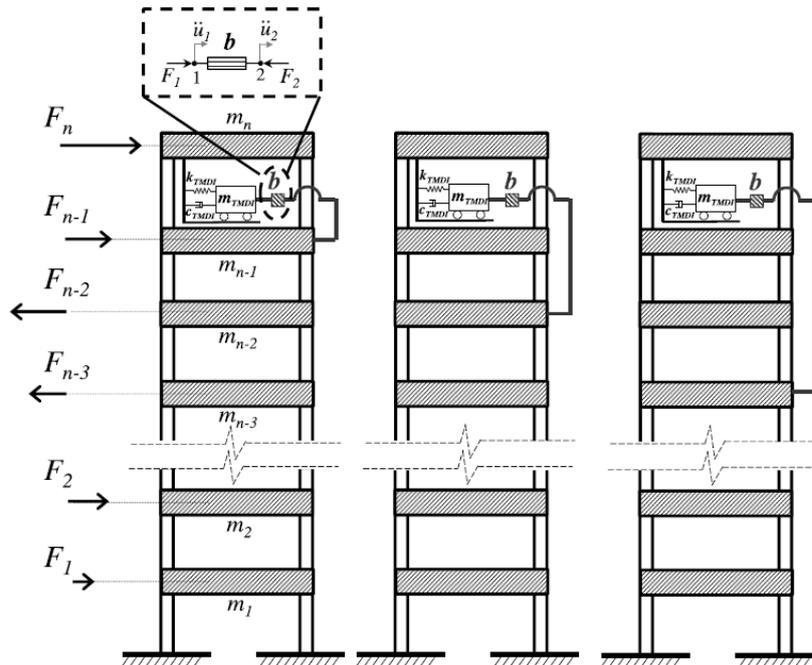
Fonte: Elaboração própria.

Utilizando um sistema com múltiplos graus de liberdade foi constatado que para um AMS garantir a mesma performance que um AIMS, é necessária uma ligação com maior rigidez e amortecimento. Também, foi concluído que o efeito de amplificação de massa do *inertor* pode ser utilizado para substituir parte da massa oscilatória do AMS, reduzindo o peso total do sistema estrutural, para um mesmo nível de desempenho na mitigação da amplitude das vibrações. Por fim, um dispositivo AIMS possui, aproximadamente, quatro vezes menos massa que um AMS para alcançar o mesmo nível de performance, considerando rigidez e amortecimento similares nos dois amortecedores. Giaralis e Taflanidis (2015) demonstraram que o uso de um elemento *inertor* em um AMS tem a capacidade de reduzir a amplitude das vibrações em modos de vibração mais altos, diferentemente do AMS que controla, a princípio, apenas o modo de vibração o qual foi sintonizado.

Giaralis e Petrini (2017a) utilizaram um AIMS para mitigar vibrações induzidas pelo vento em edifícios altos. Através de um modelo tridimensional em elementos finitos de um edifício de 74 pavimentos, os autores derivaram um sistema dinâmico de ordem reduzida para

realizar os estudos numéricos. Um dos terminais do dispositivo inerter foi acoplado a um AMS alocado no topo do edifício, enquanto outro foi disposto em diferentes pavimentos, conforme ilustrado na Figura 2.21. O terminal do *inertor* conectado em pavimentos mais baixos podem potencializar forças no elemento *inertor* com uma mesma inertância b , em razão de seus terminais têm menor probabilidade de experienciar acelerações em fase. Foi constatado, como em outros estudos, o desempenho superior o AIMS em relação ao AMS. Também, foi constatada uma redução nas respostas de deslocamento e aceleração em modos mais altos.

Figura 2.21 – AIMS conectado com pavimentos mais baixos.



Fonte: (Giaralis e Petrini, 2017a).

Giaralis e Taflanidis (2018) realizaram um estudo de otimização de um AIMS para o controle de estruturas MGDJ sujeitas à excitação sísmica. É aplicado um modelo de incertezas baseado em confiabilidade. Os critérios de confiabilidade são adotados para quantificar o desempenho estrutural. É utilizado um processo estocástico gaussiano estacionário de ruído branco com filtro. A excitação sísmica é descrita pela função espectral de banda-larga com filtro Kanai-Tajimi. Foi demonstrado que o elemento *inertor* no AMS melhora a performance no controle das respostas dinâmicas. Também, o projeto do AIMS é menos influenciado pelas fontes de incertezas que o dispositivo AMS.

Pietrosanti *et al.* (2021) realizaram um estudo experimental de um sistema com isolamento de base e um AIMS sob uma mesa de vibração. O objetivo do estudo foi compreender o desempenho de um DBI em atenuar as respostas dinâmicas de estruturas com

sistema de isolamento de base (SIB). Também, é levado em conta o comportamento não-linear dos componentes do SIB e a consideração de um elemento *inertor* não-ideal. Foi constatado que o AIMS é capaz de melhorar significativamente o desempenho geral do sistema com SIB. Ademais, o uso de modelos de DBI assumindo um comportamento ideal do *inertor* apresenta uma acurácia suficiente para projetos de dispositivos AIMS.

Outros estudos com foco no AIMS podem ser encontrados em: Brzeski *et al.* (2015), Brzeski *et al.* (2017), Giaralis e Petrini (2017b), Pietrosanti *et al.* (2017), Ruiz *et al.* (2018), Chen *et al.* (2019), De Angelis *et al.* (2019), Baduidana e Kenfack-Jiotsa (2022), Liu *et al.* (2022), Li *et al.* (2023), Caicedo *et al.* (2023), Da Costa (2023), Liang *et al.* (2023), Quan *et al.* (2023), Peng *et al.* (2023) e Rajana *et al.* (2023).

Os trabalhos citados demonstram a eficiência de diferentes DBI no controle de vibrações. No uso isolado desses amortecedores, como o AIS, os dispositivos demonstraram grande eficiência na proteção sísmica de estruturas em relação aos AMS tradicionais. Na aplicação conjunta AMS+*inertor*, o elemento *inertor* potencializa a eficiência do AMS e é capaz de controlar modos de vibração mais altos além do modo sintonizado. Outra vantagem é a redução do deslocamento (*stroke displacement*) do AMS (Abdeddaim *et al.*, 2020).

Vale ressaltar ainda que os dispositivos baseados em *inertor* são mecanismos simples e de fácil manutenção, o que torna sua utilização viável para o controle de vibrações. Recentemente, sobre a aplicação de dispositivos baseados em *inertor*, recomenda-se os trabalhos de Ma *et al.* (2021) e Wagg (2023).

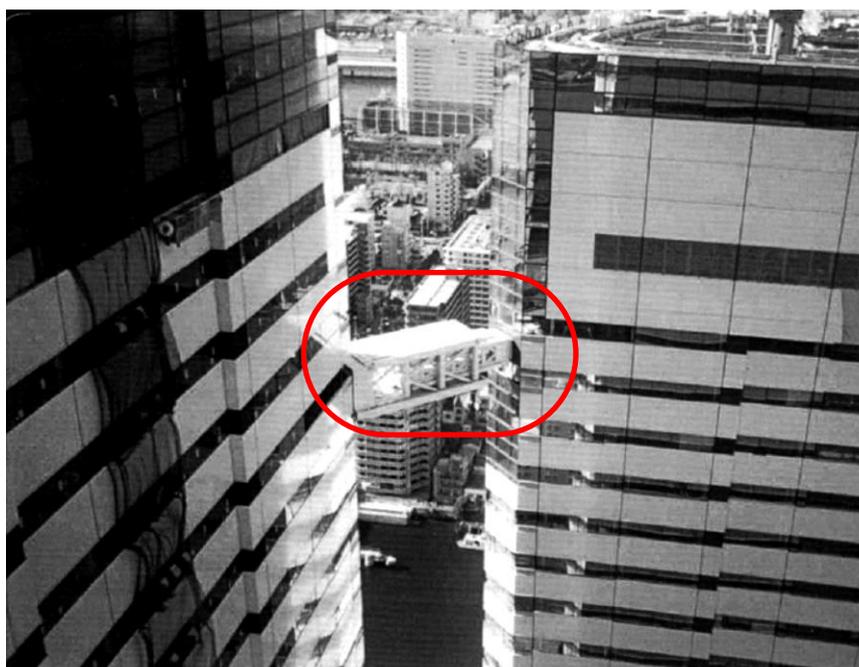
2.3 CONTROLE DE VIBRAÇÕES EM EDIFICAÇÕES ADJACENTES POR ACOPLAMENTO ESTRUTURAL

A técnica de acoplamento estrutural em estruturas adjacentes tem o objetivo de mitigar a amplitude de vibrações e impedir o impacto entre essas edificações. O princípio dessa técnica é conectar edificações adjacentes através de dispositivos de controle, fazendo com que uma estrutura exerça forças sobre a outra e, dessa forma, seja possível reduzir a resposta individual de cada estrutura, além de atenuar a resposta global do sistema acoplado. Na Figura 2.22 apresenta-se uma aplicação real da técnica de acoplamento estrutural, na qual, três edifícios foram acoplados através de dispositivos semiativos.

Preocupados com o possível impacto (*pounding*) entre edificações próximas quando submetidas à ação de sismos ou ventos fortes, Klein *et al.* (1972), nos Estados Unidos,

propuseram o primeiro estudo sobre a técnica de acoplamento estrutural. Klein e Healy (1987) apresentaram um sistema de duas edificações adjacentes conectadas por cabos, o qual, era gerido por um algoritmo de controle semiativo. Em seus estudos puderam concluir que a controlabilidade do sistema só era garantida se as frequências naturais principais das edificações fossem distintas. Também, afirmaram que a posição ótima dos cabos era no topo da estrutura, devido à ocorrência dos maiores deslocamentos neste local. A partir desses estudos pioneiros, diversas pesquisas foram realizadas com a técnica de acoplamento estrutural com a aplicação de dispositivos de controle ativo, passivo e semiativo na conexão entre as edificações (Xu *et al.*, 1999; Christenson *et al.*, 2007; Abdel Raheem, 2014; Palacios-Quiñonero *et al.*, 2017; Al-Fahdawi *et al.*, 2019b; a; Peña *et al.*, 2020; Pippi *et al.*, 2020; Pippi *et al.*, 2020; Elwardany *et al.*, 2022; Hatipoglu e Duzgun, 2023; Zhang, S. R. *et al.*, 2023).

Figura 2.22 – Sistema de acoplamento estrutural. Escritório *Triton Square*, *Tokyo*.



Fonte: (Christenson *et al.*, 2007).

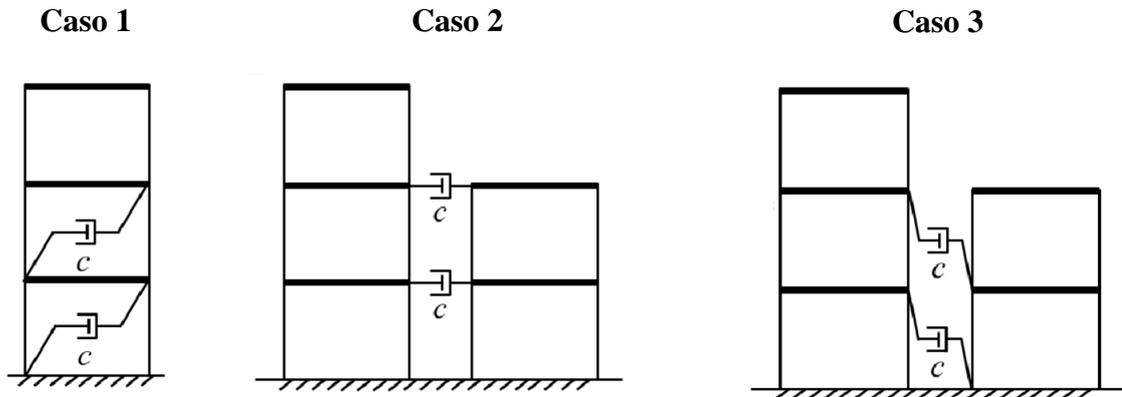
Os estudos mais aprofundados sobre essa técnica comprovaram a sua eficiência sob diversos tipos de conexões, características de edifícios adjacentes e diferentes solicitações (Westermo, 1989a; Graham, 1994; Luco e De Barros, 1998b; Abdullah *et al.*, 2001; Yang *et al.*, 2003; Roh *et al.*, 2011; Pérez *et al.*, 2014; Bigdeli *et al.*, 2016; Patel, 2017; Peña, 2017; Peña *et al.*, 2020; Pippi, A. *et al.*, 2020; Baheti e Matsagar, 2022; Elwardany *et al.*, 2022; Hatipoglu e Duzgun, 2023; Kandemir e Jankowski, 2023; Patel, 2023; Zhang, S. R. *et al.*, 2023). Entre as constatações, pode-se citar:

- As características das edificações e da solicitação modificam a eficiência da técnica de acoplamento estrutural;
- A rigidez na conexão aumenta a primeira frequência do sistema acoplado;
- O amortecimento na conexão não tem influência sobre as frequências do sistema acoplado, porém, aumenta as razões de amortecimento do sistema;
- Os valores de rigidez e amortecimento devem ser otimizados, pois podem ocorrer efeitos negativos devido à má escolha desses parâmetros;
- O aumento do número de amortecedores que conectam duas estruturas pode ter pouco efeito na redução das respostas dinâmicas;
- Normalmente, o controle ativo na conexão é mais eficiente que o controle passivo, pois são adaptáveis a diferentes condições de carregamento;
- O uso de apenas um dispositivo de controle na conexão pode gerar uma força de saída alta e centralizada, o que pode causar efeitos indesejáveis nas estruturas.

Doroudi e Hosseini Lavassani (2021) realizaram uma investigação bibliográfica aprofundada sobre a técnica de acoplamento estrutural. Nesse estado da arte é possível encontrar os principais estudos realizados sobre essa técnica até o ano de 2021. Os autores subdividem a revisão por sessões que englobam estudos de estruturas conectadas por ligações rígidas, dispositivos de controle passivo, semiativo, ativo e sistemas com controle híbrido.

Chen e Wu (2022) estudaram o desempenho de edifícios adjacentes conectados por amortecedores viscofluídos. Três casos foram investigados, conforme ilustrado na Figura 2.23. Foi também executado um modelo computacional tridimensional de um edifício de concreto armado com 23 pavimentos adjacente a um contendo 10 pavimentos no software SAP2000®. Foi concluído que é possível obter maior amortecimento modal em modos mais altos no caso 1, enquanto nos casos 2 e 3 os amortecedores são capazes de dissipar mais energia no primeiro modo. Também, a performance de acréscimo de amortecimento modal é similar nos casos 2 e 3. Por fim, os autores destacam que o projeto de amortecedores para conectar duas estruturas adjacentes deve ser cuidadosamente realizado. O uso de dispositivos em diferentes pavimentos é incentivado.

Figura 2.23 – Casos estudados pelos autores



Fonte: (Chen e Wu, 2022).

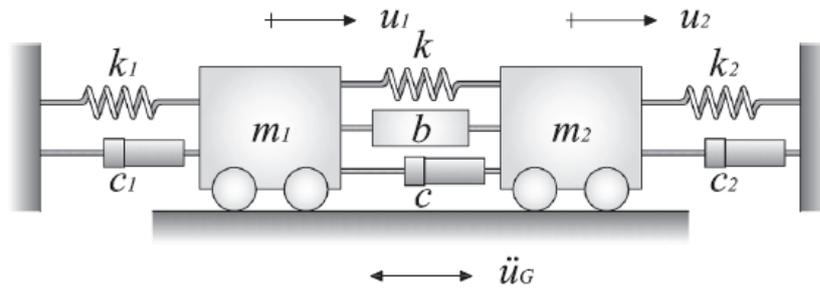
Trabalhos recentes sobre a técnica de acoplamento estrutural são encontrados em: Baheti e Matsagar (2022), Hatipoglu e Duzgun (2023), Kandemir e Jankowski (2023), Patel (2023), Zhang, S. R. *et al.* (2023), Zhang, S., Tang, X., *et al.* (2023) e Zhang, S., Li, S., *et al.* (2023).

A aplicação do elemento *inertor* na técnica de acoplamento estrutural é recente e foi proposta por Basili *et al.* (2017) e Palacios-Quiñonero *et al.* (2017). Na próxima sessão, os trabalhos sobre a aplicação de DBI como elemento de conexão entre duas estruturas adjacentes são descritos para elencar as principais vantagens dessa proposta.

2.4 O USO DE DISPOSITIVOS BASEADOS EM *INERTER* NA TÉCNICA DE ACOPLAMENTO ESTRUTURAL

Uma das primeiras aplicações de um dispositivo *inertor* no acoplamento entre duas estruturas adjacentes foi realizada no trabalho de Basili *et al.* (2017). Utilizando um modelo simplificado com duas massas conectadas através de um sistema mola-amortecedor-*inertor*, conforme ilustrado na Figura 2.24, os autores estudaram a influência de cada elemento da conexão. Em uma conexão sem amortecimento foi possível encontrar pontos de antirressonância. Além disso, pequenos deslocamentos podem ser alcançados próximos a zona de ressonância. Para isso, é importante que os valores dos parâmetros de conexão sejam cuidadosamente escolhidos.

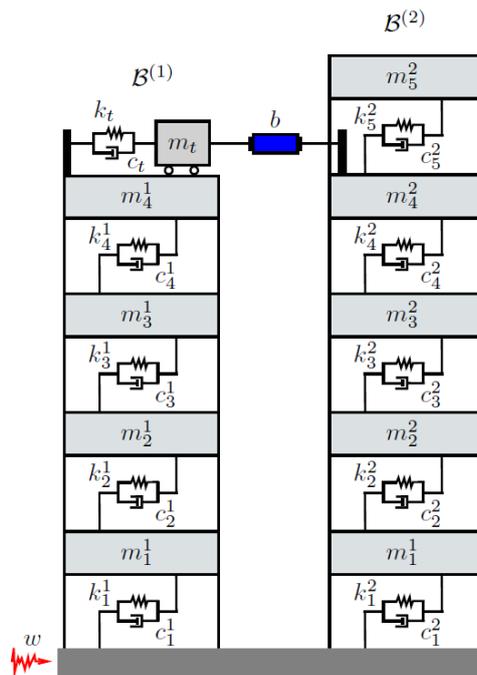
Figura 2.24 – Modelo mecânico com conexão mola-amortecedor-*inertor*.



Fonte: (Basili *et al.*, 2017).

No mesmo ano, Palacios-Quiñonero *et al.* (2017) estudaram a utilização de um elemento *inertor* conectando um AMS de um edifício a outro edifício adjacente, conforme apresentado na Figura 2.25. Duas configurações foram estudadas. A primeira considera um amortecedor *inertor* de massa sintonizado (AIMS), no qual, a massa m_t do AMS tem um valor considerável. A segunda considera um amortecedor *inertor* sintonizado (AIS), em que a massa m_t é muito pequena. Foi possível observar que a configuração com o AIMS foi ligeiramente mais eficiente na atenuação dos deslocamentos relativos entre pavimentos, com reduções em torno de 20 %. Porém, com o AIS é possível obter uma massa m_t praticamente nula, além da necessidade de menores valores de amortecimento e rigidez para o AMS. Por fim, a inertância b é reduzida em 82 % no AIS comparado ao AIMS.

Figura 2.25 – AMS compartilhado conectado através de um elemento *inertor*.

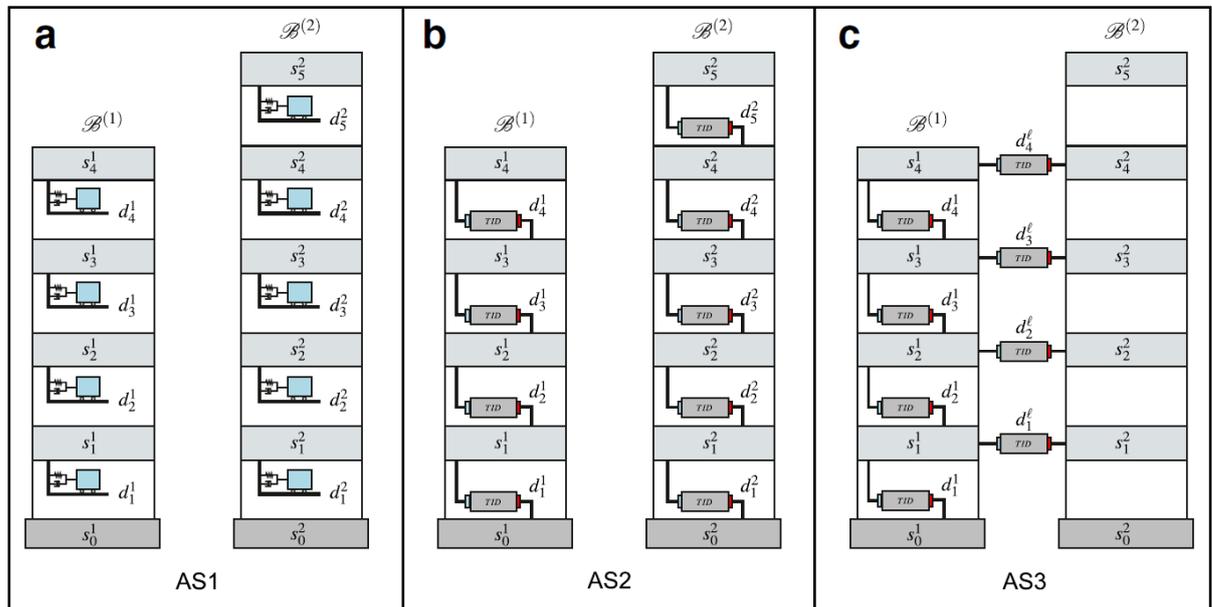


Fonte: (Palacios-Quiñonero *et al.*, 2017).

Basili *et al.* (2018) realizaram um estudo mais aprofundado que o efetuado em 2017. O mesmo modelo mecânico da Figura 2.24 foi aplicado. Os autores constataram que o dispositivo *inertor*, quando utilizado isoladamente na conexão, sempre irá reduzir ambas as frequências dos edifícios acoplados. Também, utilizaram uma excitação harmônica para verificar a eficiência do sistema de controle na redução dos deslocamentos. Os autores concluíram que a melhor escolha seria um dispositivo com a razão de massa do *inertor* mínima ($\beta = b/m_1$). A razão β_{\min} é o mínimo valor de β que fornece um sistema com frequências e razões de amortecimento iguais. Nessa razão, ambas as estruturas possuem uma amplificação mínima única.

Palacios-Quiñonero *et al.* (2019) investigaram três configurações de distribuição de amortecedores em edifícios adjacentes, conforme ilustrado na Figura 2.26. Na configuração AS1 é considerado um AMS em cada pavimento, sem conexão entre as estruturas. Na AS2, as edificações também não são conectadas, porém, são utilizados um AIS (*Tuned Inertor Damper* em inglês) em cada pavimento. A configuração AS3 considera que na estrutura menor, cada pavimento tem um AIS e que está acoplada à estrutura maior através de outros 4 dispositivos AIS.

Figura 2.26 – Configurações de edifícios adjacentes.



Fonte: Palacios-Quiñonero *et al.* (2019).

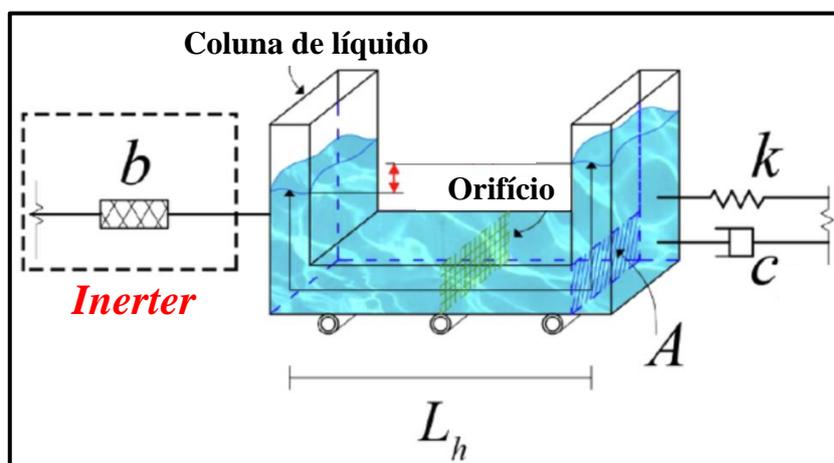
Para obtenção dos parâmetros dos dispositivos foi utilizado o algoritmo de otimização por enxame de partículas PSO (*Particle Swarm Optimization*). As configurações AS2 e AS3 obtiveram melhores performances na redução dos deslocamentos relativos. Para a estrutura de

maior altura foram alcançadas reduções de deslocamento relativo máximo em torno de 58 % e 46 % nas configurações AS2 e AS3, respectivamente. Para o sismo de Northridge, também na estrutura maior, as reduções foram de 30 % na configuração AS2 e 25 % na AS3. Na estrutura menor as reduções ficaram em torno de 40 % em ambos os sismos.

De Domenico *et al.* (2020) utilizaram o sistema denominado múltiplos-AIMS (MAIMS) no acoplamento entre duas edificações adjacentes. Esse sistema consiste no uso de diversos AIMS conectando as estruturas. Para determinação dos parâmetros ótimos de controle, foram utilizados três critérios: o deslocamento relativo entre os edifícios, deslocamento relativo entre pavimentos e aceleração absoluta. Para a otimização 44 registros de acelerações de sismos são aplicados e as funções objetivo são formadas a partir dos critérios citados com a média dos resultados dos 44 sismos. É constatado que o sistema de controle apresenta um desempenho satisfatório, principalmente na redução das acelerações máximas. As frequências predominantes das solicitações sísmicas exibem importantes efeitos sobre a performance do controle. Quando a frequência predominante do sismo de entrada é próxima da primeira frequência do sistema acoplado, o sistema MIAMS tem reduções consideráveis nas respostas dinâmicas.

Wang *et al.* (2020) realizaram um importante trabalho na técnica de acoplamento estrutural, comparando diversos DBI e dispositivos de controle com o Amortecedor *Inerter* de Coluna de Líquido Sintonizado (AICLS) na conexão entre estruturas adjacentes. Na Figura 2.27 está apresentado uma ilustração desse dispositivo. Para determinação dos parâmetros ótimos dos dispositivos foi utilizada um algoritmo de otimização multiobjetivo com funções baseadas em aceleração absoluta e deslocamento relativo entre pavimentos.

Figura 2.27 – Dispositivo AICLS.

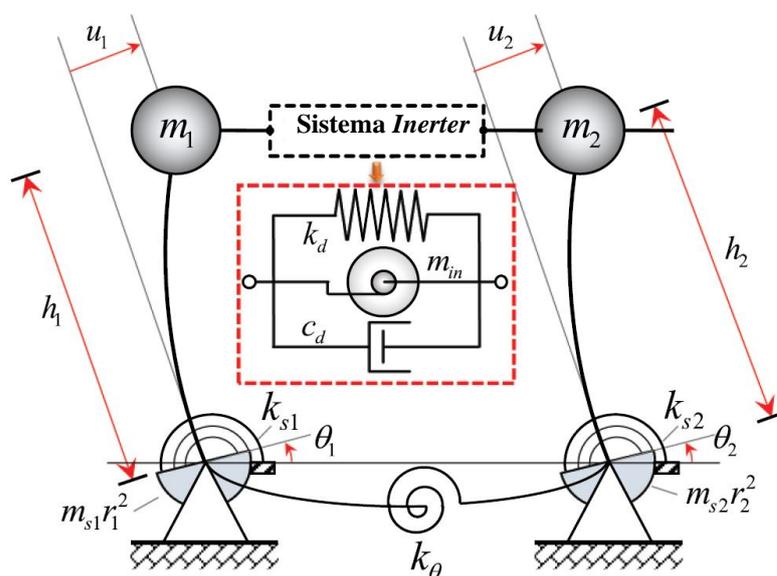


Fonte: (Di Matteo *et al.*, 2022).

Os estudos apontaram que o AICLS é uma solução que apresenta melhor desempenho no controle das respostas dinâmicas que dispositivos como o ALS, ACLS, AMS, AIS e AIMS.

Zhao *et al.* (2020) analisaram estruturas adjacentes acopladas com DBI considerando a Interação Solo-Estrutura (ISE). O modelo aplicado está ilustrado na Figura 2.28. Foi também estudado os efeitos da proximidade dos edifícios. Foi constatado que o desempenho do sistema *inertor* é reduzido quando se considera a ISE. Também, o efeito da proximidade é importante apenas em edificações muito próximas. Em síntese, é sugerida a inclusão da ISE em projetos que utilizem DBI.

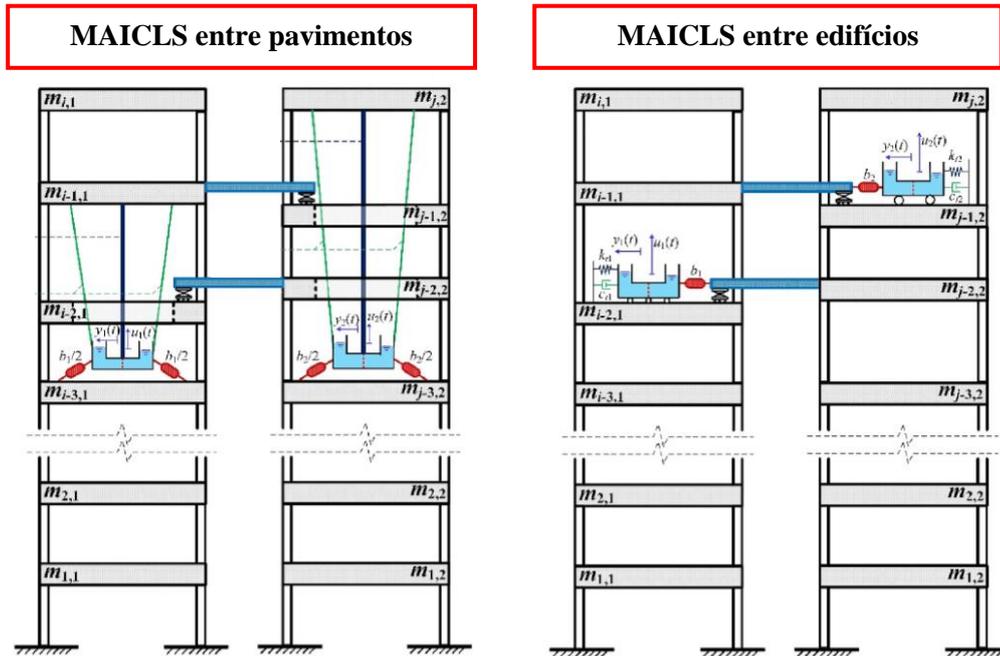
Figura 2.28 – Edifícios acoplado sob base flexível.



Fonte: (Zhao *et al.*, 2020).

Já em 2021, Wang, Qiao, *et al.* (2021) aplicaram o múltiplo-AICLS (MAICLS) para atenuar as respostas dinâmicas de edificações adjacentes. O conceito do MAICLS é similar ao dispositivo MAIMS. Nesse trabalho, os autores estudaram a distribuição do MAICLS entre os pavimentos de cada edificação, e o acoplamento era realizado por amortecedores viscofluídos. Também, realizaram a conexão das estruturas através do MAICLS, conforme Figura 2.29. Uma importante conclusão dos autores é que quando os edifícios têm uma diferença maior entre suas frequências naturais, a conexão entre eles através do MAICLS é mais efetiva, pois há uma tendência de maiores movimentos relativos.

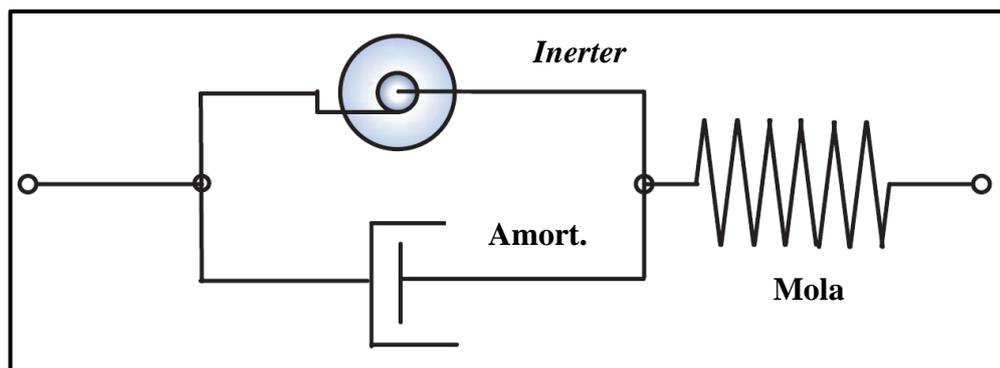
Figura 2.29 – Modelos de edificações adjacentes com MAICLS.



Fonte: (Wang, Qiao, *et al.*, 2021).

Os estudos de Lu *et al.* (2021) compararam a performance de amortecedores viscosos (AV) e amortecedores viscosos de massa inercial (AVMI) no controle de edificações adjacentes conectadas por uma passarela. Na Figura 2.30 está apresentado o modelo de um AVMI. Como excitação no solo é aplicada uma análise estocástica utilizando a função de Kanai-Tajimi com filtro. Na comparação com os AV tradicionais, o AVMI apresentou resultados mais efetivos na redução dos deslocamentos. Ademais, apresentou também maior eficiência no amortecimento para a passarela em uma ampla faixa de rigidez axial. Os autores comentam que o AVMI não terá um desempenho satisfatório se as configurações do amortecedor violarem as especificações ótimas. Por fim, constaram que o AVMI consegue absorver mais energia com uma menor razão de amortecimento.

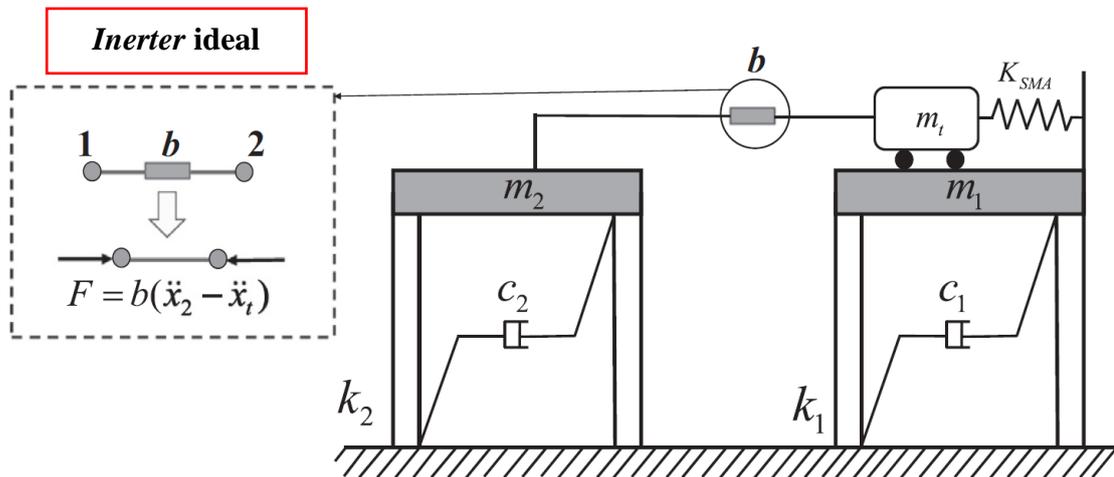
Figura 2.30 – Modelo do dispositivo AVMI.



Fonte: (Zhang *et al.*, 2020).

Tiwari *et al.* (2021) aplicaram um dispositivo de controle passivo denominado *shape memory alloy tuned mass damper inerter* (titulado nesse trabalho como SMA-AIMS) para controlar as vibrações de sistemas de estruturas com 1 grau de liberdade (1GDL) acopladas. O sistema SMA dissipa a energia do oscilador através de uma transformação de fase histerética. Na Figura 2.31 está apresentada uma ilustração dos edifícios acoplados. O estudo de otimização aplica uma análise estocástica com excitação estacionária e não-estacionária, comparando o desempenho do SMA-AIMS e do AIMS tradicional no acoplamento estrutural. Os resultados indicaram que o SMA-AIMS apresenta uma performance superior utilizando ruído branco, excitação Kanai-Tajimi e registros sísmicos que o AIMS como dispositivo de conexão entre estruturas 1GDL.

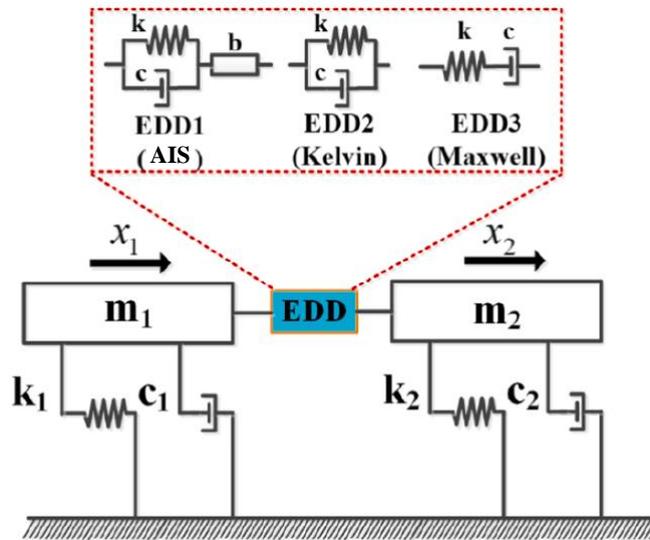
Figura 2.31 – Sistema acoplado com dispositivo SMA-TMDI.



Fonte: (Tiwari *et al.*, 2021).

Com objetivo de reduzir as vibrações excessivas em pontes adjacentes, Song *et al.* (2021) efetuaram um estudo numérico sobre a viabilidade da técnica de acoplamento estrutural. Como dispositivos de conexão foram aplicados o AIS, o amortecedor viscoelástico do tipo Maxwell e amortecedor viscoelástico do tipo Kelvin, conforme ilustrado na Figura 2.32. Como critério de otimização adotaram a soma das energias cinética e potencial de ambas as pontes. É observado que o sistema conectado com o AIS alcança o mesmo desempenho no controle das respostas dinâmicas que os dispositivos viscoelásticos, porém, com um coeficiente de amortecimento consideravelmente menor. Quando a razão de frequência entre as estruturas é de 0,50, a efetividade do controle atinge 70 %. Por fim, foi concluído que a estrutura com maior flexibilidade é mais favorecida quando o sistema é acoplado.

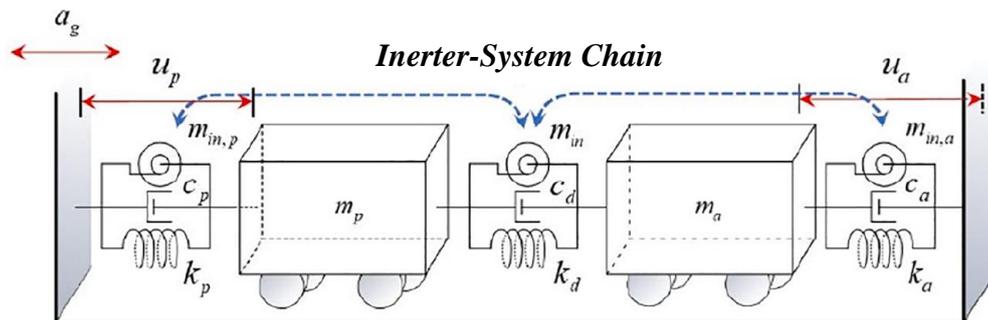
Figura 2.32 – Modelo pontes adjacentes acopladas.



Fonte: (Song *et al.*, 2021).

Chen *et al.* (2021) apresentaram um sistema novo para conexão de edificações adjacentes chamado de sistema *inertor* em série (*Inertor-system chain*). O sistema pode ser visualizado na Figura 2.33. O objetivo principal do estudo era demonstrar o potencial de sistemas com *inertor* em melhorar o desempenho de energia do sistema. Através de uma análise estocástica de balanço de energia é possível concluir que o sistema é capaz de reduzir o deslocamento, esforço cortante na base e a carga de dissipação de energia das estruturas acopladas. Para um sistema efetivo de controle é importante que o sistema contenha a cadeia completa de elementos *inertor*.

Figura 2.33 – *Inertor-system chain*.

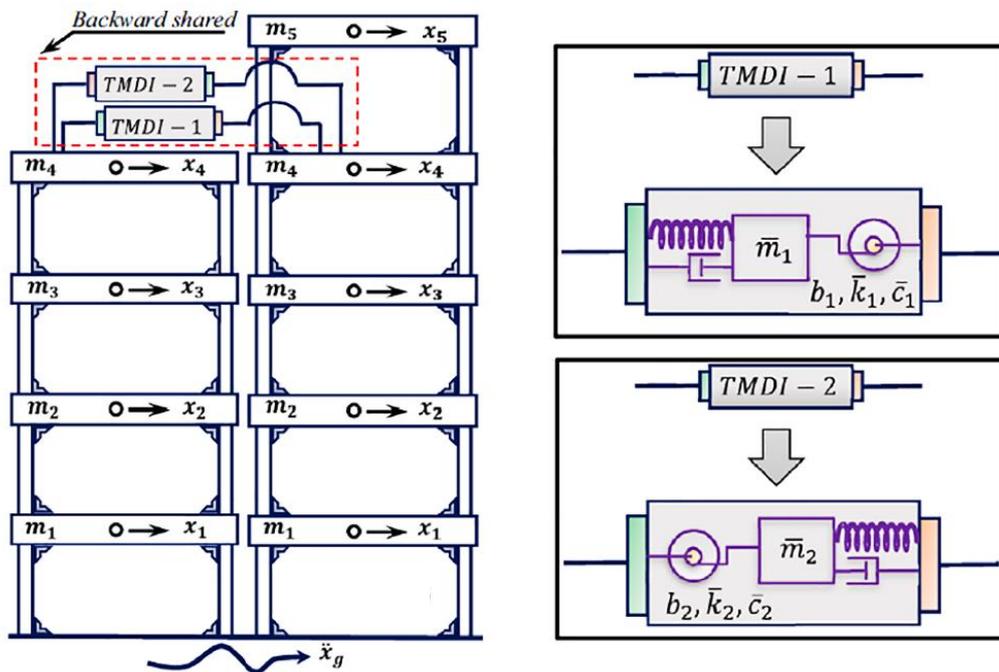


Fonte: (Chen *et al.*, 2021).

Djerouni *et al.* (2021) realizaram um estudo de edifícios acoplados com dispositivos denominados *backward-shared tuned mass damper* (BSTMDI) e *backward-shared tuned inertor damper* (BSTID). Esse sistema consiste em dois dispositivos AIMS (TMDI na sigla em inglês) ou AIS (TID na sigla em inglês) conectados de forma contrária um ao outro, conforme

apresentado na Figura 2.34. São aplicados 100 componentes de registros sísmicos para avaliar o desempenho do sistema de controle. É observado que os edifícios acoplados com BSTMDI reduz os deslocamentos relativos entre pavimentos da estrutura mais flexível com maior eficiência. Por outro lado, o sistema BSTID é mais eficiente na estrutura com maior rigidez.

Figura 2.34 – Sistema BSTMDI.



Fonte: (Djerouni *et al.*, 2021).

Kang *et al.* (2023) aplicaram um AIS e um AVMS para acoplar dois edifícios adjacentes. No estudo, o AVMS foi denominado como AIS paralelo. Os edifícios são modelados como estruturas de 1GDL. Os autores constataram que o AVMS apresentou melhor eficiência no controle das vibrações de ambos os edifícios e é capaz de atuar em uma de faixa de frequências mais ampla. Quando o amortecimento da edificação é baixo, um pequeno aumento na razão de frequência pode atenuar a função de resposta de frequência. Por fim, foi concluído que o AIMS dissipa energia sísmica principalmente em razão do grande amortecimento, enquanto o sistema com AIS protege as edificações convertendo energia sísmica em energia dinâmica.

Estudos sobre o acoplamento estrutural aplicando DBI também foram realizados nos trabalhos de: Basili *et al.* (2019), Wang, Tiwari, *et al.* (2021), Wu *et al.* (2021), Djerouni *et al.* (2022), Djerouni *et al.* (2023) e Song *et al.* (2023). Por fim, um estado da arte recente sobre o assunto pode ser conferido em Pippi *et al.* (2022).

Os estudos citados demonstram a capacidade da técnica de acoplamento estrutural no controle de vibrações em estruturas adjacentes. Diversas configurações de edifícios com

diferentes razões de massa e rigidez foram apresentadas. Também, esses trabalhos consideram o uso de distintos dispositivos de controle na conexão entre as estruturas. A escolha dos dispositivos que conectam as estruturas depende de fatores como o grau de intensidade da ação externa, da mão de obra disponível, da tecnologia à disposição, de fatores econômicos e, também, do espaço necessário para alocação desses dispositivos, caso sejam empregados com os edifícios já construídos em funcionamento. Na bibliografia consultada, ainda são escassos os estudos de DBI conectando estruturas adjacentes. A literatura consultada comprova a eficiência desses dispositivos com a vantagem de serem simples, leves e de dimensões reduzidas. Além disso, possuem a capacidade de potencializar a eficiência de outros dispositivos de controle, como o AMS. Dessa forma, é um dispositivo com grande capacidade de controle e adaptabilidade em seu uso.

O método de otimização é um ponto chave na determinação dos parâmetros ótimos dos DBI. É perceptível que a análise estocástica é uma alternativa utilizada na obtenção das respostas dinâmicas. Porém, não há um consenso sobre qual melhor caminho para otimizar os sistemas acoplados. Também, não há trabalhos experimentais sobre DBI na técnica de acoplamento estrutural. Assim, a investigação e realização de análises experimentais é uma importante contribuição para compreender melhor o comportamento desses sistemas.

3 FORMULAÇÃO MATEMÁTICA

Neste capítulo é apresentada a formulação matemática para determinar o comportamento dinâmico de edifícios adjacentes acoplados sobre base fixa. Os edifícios são modelados de forma simplificada considerando-os do tipo *shear frame*, ou seja, com as seguintes características:

- Massa concentrada no centroide do pavimento;
- Pavimentos infinitamente rígidos em relação aos pilares;
- Base perfeitamente engastada (na base fixa).

A ação sísmica é considerada uniforme na base das estruturas. A distância entre as edificações é desconsiderada nos cálculos, porém, supõe-se que seja suficiente para instalação dos dispositivos.

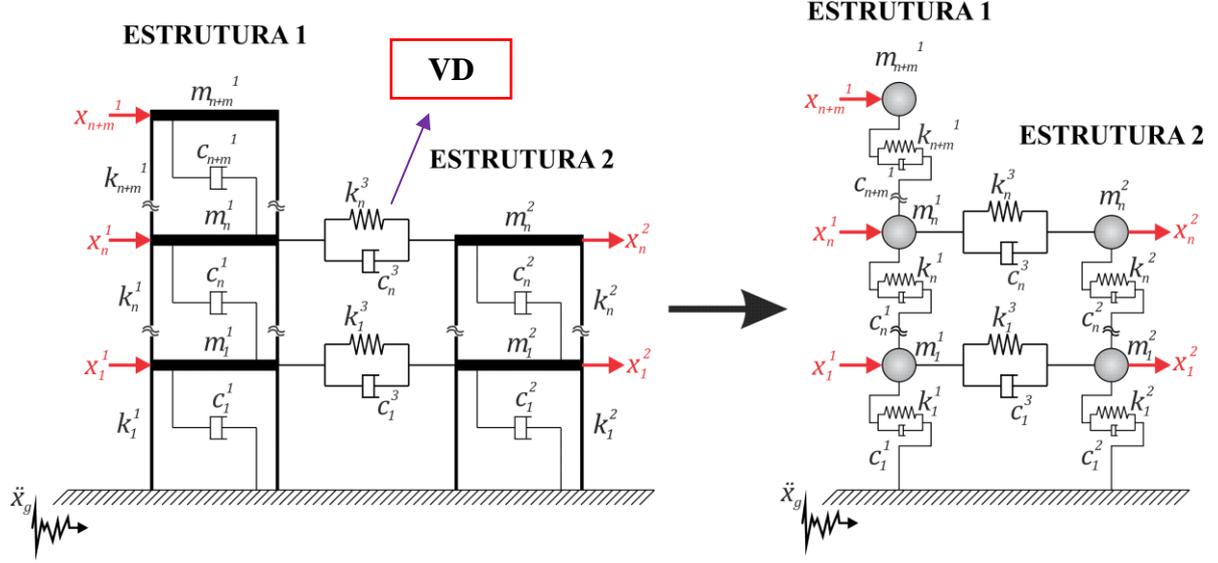
Em um segundo momento são apresentadas as bases do método de otimização empregado neste trabalho. Também, são evidenciadas as funções objetivo utilizadas com a finalidade de determinar a melhor posição dos dispositivos de controle e as suas propriedades mecânicas.

3.1 EDIFÍCIOS ADJACENTES ACOPLADOS POR AMORTECEDOR VISCOELÁSTICO

A formulação descrita a seguir é baseada nos trabalhos de Bigdeli (2012), Bigdeli *et al.* (2016), Peña (2017) e Uz e Hadi (2017). É apresentado o equacionamento para um caso geral de edifícios adjacentes. O amortecedor viscoelástico ou viscofluido (caso em que a rigidez da ligação é igual a zero) será denominado como VD.

Os modelos de estruturas adjacentes e o modelo massa-mola-amortecedor são apresentados na Figura 3.1. A estrutura maior (estrutura 1) possui $n + m$ pavimentos e a estrutura menor (estrutura 2) contém n pavimentos, sendo j referente à edificação ($j = 1, 2$). As propriedades de massa, amortecimento e rigidez de cada pavimento i são, respectivamente, m_i^j , c_i^j , k_i^j . Os amortecedores viscoelásticos que conectam as estruturas no pavimento n possuem os valores de rigidez e amortecimento igual a k_n^3 e c_n^3 , respectivamente. Por fim, \ddot{X}_g é a aceleração do solo.

Figura 3.1 – Modelo de estruturas adjacentes acopladas.



Fonte: (Peña, 2017).

Os valores $x_{n+m}^1(t)$ e $x_n^2(t)$ são os deslocamentos dos dois edifícios no domínio do tempo. As velocidades e acelerações, são, respectivamente, $\dot{x}_{n+m}^1(t)$, $\dot{x}_n^2(t)$, $\ddot{x}_{n+m}^1(t)$ e $\ddot{x}_n^2(t)$.

A equação do movimento para um sistema de estruturas acopladas é dada por:

$$\mathbf{M}_{ee} \ddot{\mathbf{x}}_{ee}(t) + \mathbf{C}_{ee} \dot{\mathbf{x}}_{ee}(t) + \mathbf{K}_{ee} \mathbf{x}_{ee}(t) = \mathbf{f}(t) \quad (3.1)$$

em que: \mathbf{M}_{ee} , \mathbf{C}_{ee} e \mathbf{K}_{ee} são as matrizes de massa, amortecimento e rigidez do sistema acoplado, respectivamente; $\ddot{\mathbf{x}}_{ee}(t)$, $\dot{\mathbf{x}}_{ee}(t)$ e $\mathbf{x}_{ee}(t)$ são os vetores que contém os valores das acelerações, velocidades e deslocamentos, respectivamente, em ambas as estruturas; $\mathbf{f}(t)$ é o vetor de força externa. As matrizes e vetores são os seguintes:

$$\mathbf{M}_{ee} = \begin{bmatrix} \mathbf{m}_{(n+m,n+m)}^1 & 0 \\ 0 & \mathbf{m}_{(n,n)}^2 \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

$$\mathbf{m}_{(n+m,n+m)}^1 = \begin{bmatrix} m_1^1 & & & \\ & \ddots & & \\ & & m_n^1 & \\ & & & \ddots \\ & & & & m_{n+m}^1 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{m}_{(n,n)}^2 = \begin{bmatrix} m_1^2 & & \\ & \ddots & \\ & & m_n^2 \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

$$\mathbf{K}_{ee} = \mathbf{K} + \mathbf{K}^3 = \begin{bmatrix} \mathbf{k}_{(n+m,n+m)}^1 & 0 \\ 0 & \mathbf{k}_{(n,n)}^2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{k}_{(n+m,n+m)}^3 & -\mathbf{k}_{(n+m,n)}^3 \\ -\mathbf{k}_{(n,n+m)}^3 & \mathbf{k}_{(n,n)}^3 \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

$$\mathbf{c}_{(n+m,n+m)}^3 = \begin{bmatrix} c_1^3 & & & & \\ & \ddots & & & \\ & & c_n^3 & & \\ & & & \ddots & \\ & & & & 0 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{c}_{(n,n)}^3 = \begin{bmatrix} c_1^3 & & & \\ & \ddots & & \\ & & \ddots & \\ & & & c_n^3 \end{bmatrix} \quad (3.12)$$

$$\mathbf{c}_{(n,n+m)}^3 = \begin{bmatrix} c_1^3 & & \cdots & 0 \\ & \ddots & & 0 \\ & & c_n^3 & \cdots & 0 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{c}_{(n+m,n)}^3 = [\mathbf{c}_{(n,n+m)}^3]^T \quad (3.13)$$

$$\mathbf{x}_{ee}(t) = \{x_1^1 \cdots x_{n+m}^1 \quad x_1^2 \cdots x_n^2\}^T \quad (3.14)$$

$$\dot{\mathbf{x}}_{ee}(t) = \{\dot{x}_1^1 \cdots \dot{x}_{n+m}^1 \quad \dot{x}_1^2 \cdots \dot{x}_n^2\}^T \quad (3.15)$$

$$\ddot{\mathbf{x}}_{ee}(t) = \{\ddot{x}_1^1 \cdots \ddot{x}_{n+m}^1 \quad \ddot{x}_1^2 \cdots \ddot{x}_n^2\}^T \quad (3.16)$$

$$\mathbf{f}(t) = \mathbf{T}_w \ddot{\mathbf{x}}_g(t) = -\mathbf{M}_{ee} \{\mathbf{1}\}_{n+m+n} \ddot{\mathbf{x}}_g(t) \quad (3.17)$$

As matrizes \mathbf{K}^3 e \mathbf{C}^3 englobam os valores de rigidez e amortecimento, respectivamente, do elemento de ligação entre as estruturas acopladas.

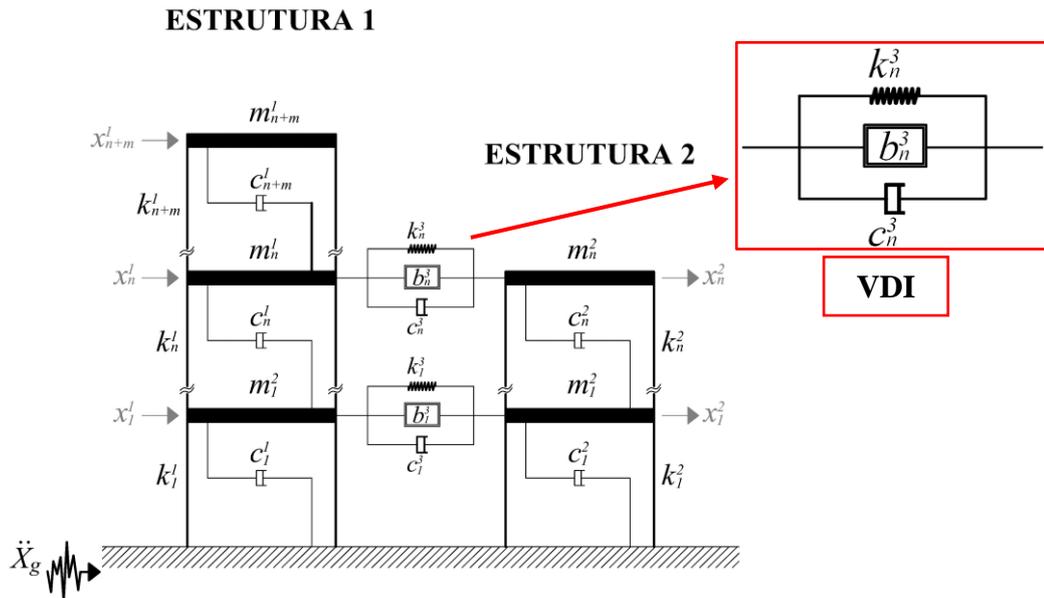
3.2 EDIFÍCIOS ADJACENTES ACOPLADOS POR UM SISTEMA MOLA-AMORTECEDOR-INERTER EM PARALELO

O dispositivo de conexão contém agora um elemento *inertor* com inertância b_n^3 , o qual, está em paralelo com um elemento de mola de coeficiente k_n^3 e um elemento de amortecimento de coeficiente c_n^3 , conforme apresentado na Figura 3.2. Nesse trabalho, o sistema é denominado como VDI.

Para essa configuração, as matrizes de rigidez \mathbf{K}_{ee} e amortecimento \mathbf{C}_{ee} do sistema acoplado são as mesmas descritas no subitem 3.1. Já a matriz de massa do sistema quando se considera um elemento *inertor* na conexão é alterada. Considerando a Eq. (3.1), a matriz de massa acoplada \mathbf{M}_{ee} para o sistema acoplado com VDI é dada por:

$$\mathbf{M}_{ee} = \mathbf{M} + \mathbf{B}^3 = \begin{bmatrix} \mathbf{m}_{(n+m,n+m)}^1 & 0 \\ 0 & \mathbf{m}_{(n,n)}^2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{b}_{(n+m,n+m)}^3 & -\mathbf{b}_{(n+m,n)}^3 \\ -\mathbf{b}_{(n,n+m)}^3 & \mathbf{b}_{(n,n)}^3 \end{bmatrix} \quad (3.18)$$

Figura 3.2 – Modelo mecânico para sistema acoplado com elemento *inertor* em paralelo.



Fonte: Elaboração própria.

E as matrizes de massa e inércia são:

$$\mathbf{m}_{(n+m,n+m)}^1 = \begin{bmatrix} m_1^1 & & & & \\ & \ddots & & & \\ & & m_n^1 & & \\ & & & \ddots & \\ & & & & m_{n+m}^1 \end{bmatrix}, \mathbf{m}_{(n,n)}^2 = \begin{bmatrix} m_1^2 & & & \\ & \ddots & & \\ & & \ddots & \\ & & & m_n^2 \end{bmatrix} \quad (3.19)$$

$$\mathbf{b}_{(n+m,n+m)}^3 = \begin{bmatrix} b_1^3 & & & & \\ & \ddots & & & \\ & & b_n^3 & & \\ & & & \ddots & \\ & & & & 0 \end{bmatrix}, \mathbf{b}_{(n,n)}^3 = \begin{bmatrix} b_1^3 & & & \\ & \ddots & & \\ & & \ddots & \\ & & & b_n^3 \end{bmatrix} \quad (3.20)$$

$$\mathbf{b}_{(n,n+m)}^3 = \begin{bmatrix} b_1^3 & & \dots & 0 \\ & \ddots & & 0 \\ & & b_n^3 & \dots & 0 \end{bmatrix}, \mathbf{b}_{(n+m,n)}^3 = [\mathbf{b}_{(n,n+m)}^3]^T \quad (3.21)$$

Na matriz \mathbf{B}^3 estão contidos os valores de inércia do elemento de ligação entre as estruturas acopladas. Os vetores de deslocamento, velocidade e aceleração também não sofrem modificações com a inserção do elemento *inertor*.

Uma forma de representar o equacionamento acima é transformar o sistema de equações de segunda ordem da Eq. (3.1) em um sistema de equações de primeira ordem fazendo uso do

espaço de estados. Para um sistema estrutural as variáveis de estado são deslocamentos e velocidades. Se um sistema contém n graus de liberdade, pode então ser separado em $2n$ equações de primeira ordem. O vetor de estado $\mathbf{z}(t)$ é dado então por:

$$\mathbf{z}(t) = \begin{bmatrix} \mathbf{x}_{ee}(t) \\ \dot{\mathbf{x}}_{ee}(t) \end{bmatrix} \quad (3.22)$$

O sistema de equações de primeira ordem é dado por:

$$\dot{\mathbf{z}}(t) = \mathbf{A}\mathbf{z}(t) + \mathbf{E}\ddot{\mathbf{x}}_g \quad (3.23)$$

Em que:

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \mathbf{0} & \mathbf{I} \\ -\mathbf{M}_{ee}^{-1}\mathbf{K}_{ee} & -\mathbf{M}_{ee}^{-1}\mathbf{C}_{ee} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{E} = \begin{bmatrix} \{\mathbf{0}\} \\ -\mathbf{M}^{-1}\mathbf{M}_{ee}\{\mathbf{1}\}_{2n \times 1} \end{bmatrix} \quad (3.24)$$

A matriz \mathbf{A} é a matriz de estado do sistema, o vetor \mathbf{E} representa o vetor de perturbação e \mathbf{I} é a matriz identidade. Sendo \mathbf{C}_r a matriz de saída do sistema, a resposta da estrutura é obtida da seguinte forma:

$$\mathbf{r}(t) = \mathbf{C}_r\mathbf{z}(t)$$

$$\mathbf{C}_r = \begin{bmatrix} \mathbf{I} & \mathbf{0} \\ -\mathbf{M}_{ee}^{-1}\mathbf{K}_{ee} & -\mathbf{M}_{ee}^{-1}\mathbf{C}_{ee} \end{bmatrix} \text{ e } \mathbf{r}(t) = \begin{Bmatrix} \mathbf{x}_{ee}(t) \\ \dot{\mathbf{x}}_{ee}(t) \\ \ddot{\mathbf{x}}_{ee}(t) \end{Bmatrix} \quad (3.25)$$

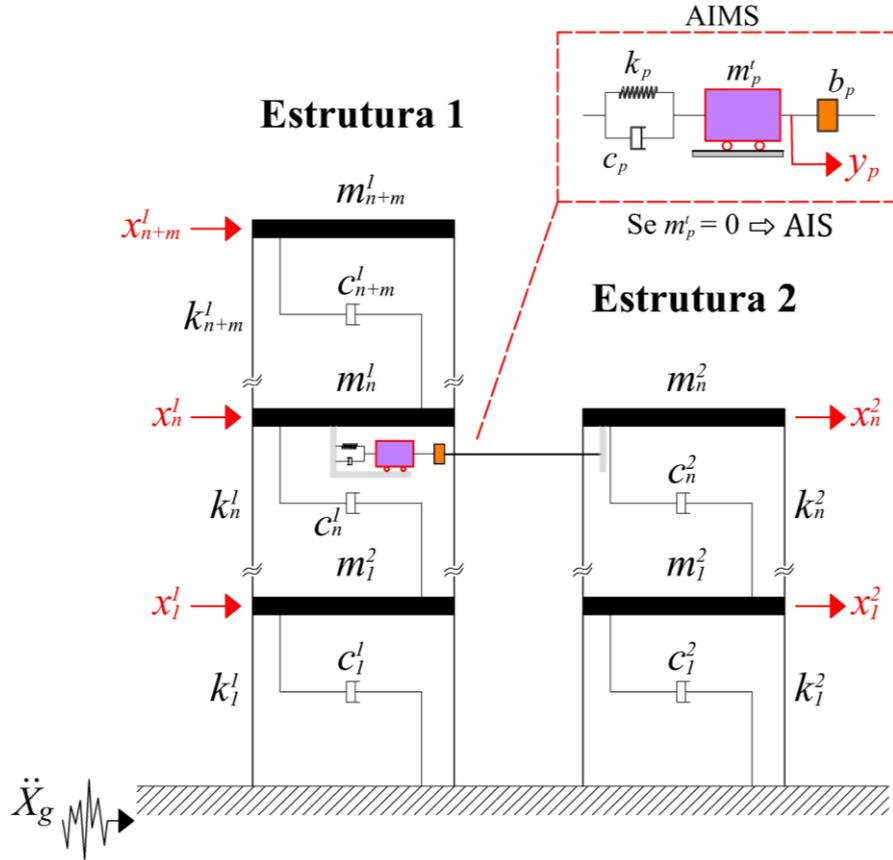
Assim, as Eq. (3.23) e Eq. (3.25) formam um sistema contínuo no tempo em espaço de estado.

3.3 SISTEMA DE ESTRUTURAS ACOPLADAS COM DISPOSITIVOS AIMS E AIS

A formulação desse subitem é fundamentada a partir do trabalho Palacios-Quiñonero *et al.* (2019). O amortecedor *inertor* sintonizado (AIS) é um caso particular do amortecedor *inertor* de massa sintonizado (AIMS). Por esse motivo, as equações apresentadas já consideram essa ocorrência.

Diferentemente da configuração do sistema apresentado no subitem 3.2, o dispositivo *inertor* é agora alocado em série aos elementos de mola e amortecimento, conforme pode ser visualizado na Figura 3.3.

Figura 3.3 – Modelo mecânico para sistema acoplado com AIMS/AIS.



Fonte: Elaboração própria.

Os valores de k_p , c_p e b_p são os coeficientes de rigidez, amortecimento e inércia, respectivamente, do dispositivo p que está conectando as duas estruturas. O valor de m_p^t representa a massa adicional e y_p é o deslocamento dessa massa em relação ao solo. A estrutura menor contém n pavimentos e a estrutura maior possui $n + m$ pavimentos. Considera-se que os parâmetros do AIMS sejam representados através das matrizes:

$$\mathbf{M}_t = \begin{bmatrix} m_1^t & 0 & 0 & 0 \\ 0 & m_2^t & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \ddots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & m_p^t \end{bmatrix}, \quad \mathbf{C}_t = \begin{bmatrix} c_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & c_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \ddots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & c_p \end{bmatrix}, \quad \mathbf{K}_t = \begin{bmatrix} k_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & k_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \ddots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & k_p \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{B}_t = \begin{bmatrix} b_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & b_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \ddots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & b_p \end{bmatrix} \tag{3.26}$$

O vetor de deslocamento de massa é:

$$\mathbf{y}(t) = \{y_1, y_2, \dots, y_p\} \tag{3.27}$$

Agora, serão utilizadas duas matrizes para identificar os pavimentos em que os dispositivos estão conectados em cada estrutura. A matriz $\mathbf{P}_c \in \mathbb{R}^{(n+m) \times p}$ representa a posição em relação ao lado esquerdo do AIMS e a matriz $\mathbf{P}_r \in \mathbb{R}^{n \times p}$ ao lado direito. Também, é aplicado o vetor $\mathbf{p} = \{p_1, p_2, \dots, p_n\}$, que contém a lista dos pavimentos conectados. Assim, as matrizes \mathbf{P}_c e \mathbf{P}_r podem ser determinadas pela extração das colunas das matrizes identidade \mathbf{I}_{n+m} e \mathbf{I}_n , respectivamente, indicadas pelo vetor \mathbf{p} .

Para exemplificar, considere um edifício de 4 pavimentos adjacente a um edifício com 3 pavimentos. Esses edifícios estão conectados nos pavimentos 1 e 3 através de dispositivos AIMS. Nesse caso, tem-se que:

$$n + m = 4, \quad n = 3, \quad p = 2.$$

$$\mathbf{p} = [1, 3];$$

$$\mathbf{I}_4 = \begin{bmatrix} \boxed{1} & 0 & \boxed{0} & 0 \\ 0 & 1 & \boxed{0} & 0 \\ 0 & 0 & \boxed{1} & 0 \\ 0 & 0 & \boxed{0} & 1 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{I}_2 = \begin{bmatrix} \boxed{1} & 0 & \boxed{0} \\ 0 & 1 & \boxed{0} \\ 0 & 0 & \boxed{1} \end{bmatrix} \quad (3.28)$$

$$\mathbf{P}_c = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{P}_r = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

O número de graus de liberdade do sistema acoplado é determinado pela seguinte soma $q = (n + m) + n + p$. Assim, a resposta dinâmica para os dois edifícios acoplados através de AIMS é descrita pela equação diferencial:

$$\mathbf{M}_{ee} \ddot{\mathbf{x}}_{ee}(t) + \mathbf{C}_{ee} \dot{\mathbf{x}}_{ee}(t) + \mathbf{K}_{ee} \mathbf{x}_{ee}(t) = -\mathbf{M}_w [\mathbf{1}]_q \times \ddot{X}_g \quad (3.29)$$

Sendo: $\mathbf{x}^1(t) = \{x_1^1 \dots x_{n+m}^1\}$ e $\mathbf{x}^2(t) = \{x_1^2 \dots x_n^2\}$ os vetores de deslocamento das estruturas 1 e 2, respectivamente, então;

$$\mathbf{x}_{ee}(t) = \begin{Bmatrix} \mathbf{x}^1 \\ \mathbf{x}^2 \\ \mathbf{y} \end{Bmatrix} \quad (3.30)$$

No subitem 3.1, as matrizes de massa (\mathbf{m}^1 e \mathbf{m}^2), rigidez (\mathbf{k}^1 e \mathbf{k}^2) e amortecimento (\mathbf{c}^1 e \mathbf{c}^2) que correspondem a cada estrutura já foram determinadas. Sendo assim, a matriz de massa para o sistema acoplado \mathbf{M}_{ee} é estabelecida da seguinte forma:

$$\mathbf{M}_{ee} = \begin{bmatrix} \mathbf{m}^1 & [0]_{(n+m) \times n} & [0]_{(n+m) \times p} \\ [0]_{n \times (n+m)} & \mathbf{m}^2 + \mathbf{P}_r \mathbf{B}_t \{\mathbf{P}_r\}^T & -\mathbf{P}_r \mathbf{B}_t \\ [0]_{p \times (n+m)} & -\{\mathbf{P}_r \mathbf{B}_t\}^T & \mathbf{M}_t + \mathbf{B}_t \end{bmatrix} \quad (3.31)$$

As matrizes de amortecimento \mathbf{C}_{ee} e rigidez \mathbf{K}_{ee} do sistema acoplado são escritas da forma:

$$\mathbf{C}_{ee} = \begin{bmatrix} \mathbf{c}^1 + \mathbf{P}_c \mathbf{C}_t \{\mathbf{P}_c\}^T & [0]_{(n+m) \times n} & -\mathbf{P}_c \mathbf{C}_t \\ [0]_{n \times (n+m)} & \mathbf{c}^2 & [0]_{n \times p} \\ -\{\mathbf{P}_c \mathbf{C}_t\}^T & [0]_{p \times n} & \mathbf{C}_t \end{bmatrix} \quad (3.32)$$

$$\mathbf{K}_{ee} = \begin{bmatrix} \mathbf{k}^1 + \mathbf{P}_c \mathbf{K}_t \{\mathbf{P}_c\}^T & [0]_{(n+m) \times n} & -\mathbf{P}_c \mathbf{K}_t \\ [0]_{n \times (n+m)} & \mathbf{k}^2 & [0]_{n \times p} \\ -\{\mathbf{P}_c \mathbf{K}_t\}^T & [0]_{p \times n} & \mathbf{K}_t \end{bmatrix} \quad (3.33)$$

Por fim, a matriz \mathbf{M}_w é diagonal e possui a seguinte forma:

$$\mathbf{M}_w = \begin{bmatrix} \mathbf{m}^1 & [0]_{(n+m) \times n} & [0]_{(n+m) \times p} \\ [0]_{n \times (n+m)} & \mathbf{m}^2 & [0]_{n \times p} \\ [0]_{p \times (n+m)} & [0]_{p \times n} & \mathbf{M}_t \end{bmatrix} \quad (3.34)$$

O procedimento para a representação do sistema em espaço de estados é o mesmo apresentado para o dispositivo VDI.

O dispositivo AIS, assim como o AIMS, acrescenta um grau de liberdade ao sistema em razão da disposição do elemento *inertor* (Zuo *et al.*, 2021). Em virtude dessa característica, pode-se comparar seu comportamento com o de um dispositivo AMS. A vantagem do AIS em relação ao AMS é em função do fato de não ser necessário acrescentar uma grande massa estática na estrutura e, também, requerer menor espaço para instalação do dispositivo (Radu *et al.*, 2019).

3.4 RESPOSTA ESTOCÁSTICA EM ESPAÇO DE ESTADOS

O equacionamento a seguir é fundamentado nos trabalhos: Der Kiureghian (1979), Clough e Penzien (2003), De La Fuente (2008), Martínez *et al.* (2013), Curadelli e Amani (2014) e Rajana *et al.* (2023).

É considerado que a perturbação do sistema é dada por um processo aleatório de ruído branco de média zero com uma função densidade espectral de potência (FDEP) de intensidade constante S_0 . Levando em conta os vetores de saída em espaço de estados sendo $\mathbf{r}(t) = \{\mathbf{x}_{ee}^T(t) \quad \dot{\mathbf{x}}_{ee}^T(t)\}$, então a matriz de covariância \mathbf{S} de $\mathbf{r}(t)$ é dada por:

$$\mathbf{S}_{ij} = \mathbf{E}[r_i r_j] \quad (3.35)$$

Em que $E[\cdot]$ é o operador de esperança e r_i é o i –ésimo elemento do vetor $\mathbf{r}(t)$.

Como o processo é aleatório de ruído branco com média zero, então \mathbf{S} satisfaz a seguinte equação diferencial:

$$\dot{\mathbf{S}} = \mathbf{A}\mathbf{S}^T + \mathbf{S}\mathbf{A}^T + \mathbf{D} \quad (3.36)$$

Na qual \mathbf{D} é a matriz de covariância entre o estado e os vetores de excitação e $\mathbf{D}_{ij} = 0$ exceto $\mathbf{D}_{2n,2n} = 2\pi S_0$.

Ainda, considerando que a excitação é estacionária, \mathbf{D} é independente do tempo, então, a solução estacionária da Eq. (3.36) pode ser obtida resolvendo a equação matricial de Lyapunov:

$$\mathbf{A}\mathbf{S}^T + \mathbf{S}\mathbf{A}^T + \mathbf{D} = \mathbf{0} \quad (3.37)$$

Quando se utiliza uma FDEP que representa um processo aleatório gaussiano estacionário $x_g(t)$, pode-se utilizar um filtro de ruído branco $x_0(t)$ através de dois filtros lineares:

$$\begin{aligned} \ddot{x}_g(t) + 2\xi_g \omega_g \dot{x}_g(t) + \omega_g^2 x_g(t) &= -(x_f(t) + x_0(t)) \\ \ddot{x}_f(t) + 2\xi_f \omega_f \dot{x}_f(t) + \omega_f^2 x_f(t) &= -\ddot{x}_0(t) \end{aligned} \quad (3.38)$$

Em que ω_g , ω_f , ξ_g e ξ_f são parâmetros do solo. As Eqs. (3.38) resultam na seguinte FDEP descrita por Clough e Penzien (2003):

$$G_{cp}(\omega) = S_0 \left(\frac{1 + 4\xi_g^2 \left(\frac{\omega}{\omega_g}\right)^2}{\left[1 - \left(\frac{\omega}{\omega_g}\right)^2\right]^2 + 4\xi_g^2 \left(\frac{\omega}{\omega_g}\right)^2} \right) \left(\frac{\left(\frac{\omega}{\omega_f}\right)^4}{\left[1 - \left(\frac{\omega}{\omega_f}\right)^2\right]^2 + 4\xi_f^2 \left(\frac{\omega}{\omega_f}\right)^2} \right) \quad (3.39)$$

sendo S_0 a intensidade do processo. A resposta estocástica da estrutura é obtida através da Eq. (3.37), em que o vetor de estado $\mathbf{r}(t)$ e a matriz de estado \mathbf{A} aumentada (com adição do filtro) são:

$$\mathbf{r} = \{\mathbf{x}^T \quad \dot{\mathbf{x}}^T \quad \mathbf{x}_f \quad \dot{\mathbf{x}}_f \quad \mathbf{x}_g \quad \dot{\mathbf{x}}_g\}^T \quad (3.40)$$

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} [0] & [I] & \{0\}^T & \{0\}^T & \{0\}^T & \{0\}^T \\ -\mathbf{M}_{ee}^{-1}\mathbf{K}_{ee} & -\mathbf{M}_{ee}^{-1}\mathbf{C}_{ee} & \omega_f^2 & 2\xi_f\omega_f & \omega_g^2 & 2\xi_g\omega_g \\ \{0\} & \{0\} & 0 & 1 & 0 & 0 \\ \{0\} & \{0\} & -\omega_f^2 & -2\xi_f\omega_f & \omega_g^2 & 2\xi_g\omega_g \\ \{0\} & \{0\} & 0 & 0 & 0 & 1 \\ \{0\} & \{0\} & 0 & 0 & -\omega_g^2 & -2\xi_g\omega_g \end{bmatrix} \quad (3.41)$$

Os elementos da matriz de covariâncias \mathbf{D} de dimensões $(2n + 4) \times (2n + 4)$ são $D_{ij} = 0$ exceto $D_{2n+4,2n+4} = 2\pi S_0$.

Com a matriz de covariâncias \mathbf{S} é possível obter o desvio-padrão dos deslocamentos máximos σ_d através de:

$$\sigma_d = \sqrt{\text{diag}(\mathbf{T}\mathbf{S}\mathbf{T}^T)} \quad (3.42)$$

Em que \mathbf{T} é uma matriz de transformação, que para esse caso, tem a forma:

$$\mathbf{T}_{2n+4,2n+4} = \begin{bmatrix} I_{n,n} & [0] \\ [0] & [0] \end{bmatrix} \quad (3.43)$$

No estudo realizado por Patel (2023) sobre edifícios acoplados com dispositivos passivos sujeitos a excitações aleatórias, foi demonstrado que o desempenho do sistema de controle era muito parecido quando se aplicavam solicitações não-estacionárias e estacionárias. Assim, o processo estacionário foi escolhido por ser mais simples e por ser aplicado um modelo de ruído branco com filtro, descrito no capítulo 4. Também, o sistema acoplado otimizado será submetido a 100 registros de acelerações reais no solo de diversos sismos, com objetivo de avaliar a eficiência da técnica de controle.

3.5 OTIMIZAÇÃO POR ENXAME DE PARTÍCULAS

Para determinar as posições, quantidade e propriedades mecânicas ótimas dos dispositivos de conexão das edificações foi utilizado o algoritmo conhecido como *Particle swarm optimization* (PSO). De fácil implementação, o algoritmo foi desenvolvido por Kennedy e Eberhart (1995) e é bastante aplicado em estudos de otimização estrutural em razão do seu menor tempo de cálculo quando comparado com outros métodos (Shabbir e Omenzetter, 2015; Hamdy *et al.*, 2016; Cui *et al.*, 2017; Palacios-Quñonero *et al.*, 2019; Djerouni *et al.*, 2022). O algoritmo PSO se baseia em uma população de indivíduos que se adaptam e retornam

estocasticamente para regiões anteriormente bem definidas. No método, as partículas (indivíduos) que representam os parâmetros de otimização movem-se por regiões definidas em busca de um local de minimização da função objetivo (Fang *et al.*, 2023).

Como função objetivo, três estratégias são utilizadas. As equações são descritas com os valores em relação ao tempo, porém, nesse trabalho é realizada uma análise estocástica. Assim, os valores aplicados nas equações são, na verdade, os desvios-padrão dos deslocamentos, velocidades e acelerações. Os deslocamentos relativos entre pavimentos são determinados em função do desvio-padrão dos deslocamentos. Destaca-se que o objetivo da otimização é minimizar cada uma dessas funções.

A primeira função objetivo, denominada **DRP**, é baseada no deslocamento relativo (Δ) máximo entre pavimentos. Estratégias de otimização que aplicam como objetivo a redução dos valores de Δ são amplamente aplicadas na engenharia de controle (Besharatian *et al.*, 2023).

A função objetivo **DRP**, apresentada na Eq. (3.46), oriunda dos estudos de Bigdeli *et al.* (2016), Peña (2017) e Pippi *et al.* (2020), é formada por duas parcelas. A primeira consiste no maior valor entre o quadrado dos deslocamentos relativos máximos entre os pavimentos das duas edificações adjacentes (Eq. 3.44). A segunda é determinada a partir da soma dos quadrados desses deslocamentos (Eq. 3.45).

$$f_1 = \max\{\max(\{\Delta\}^1)^2 \quad \max(\{\Delta\}^2)^2\} \quad (3.44)$$

$$f_2 = \sum_{i=1}^{n+m} (\{\Delta\}_i^1)^2 + \sum_{i=1}^{n+m} (\{\Delta\}_i^2)^2 \quad (3.45)$$

$$f_{DRP} = f_1 + f_2 \quad (3.46)$$

Os deslocamentos relativos entre pavimentos são calculados da seguinte forma:

$$\begin{cases} \{\Delta\}_i^j = \max(\mathbf{x}_i^j) \\ \{\Delta\}_i^j = \max(\mathbf{x}_i^j - \mathbf{x}_{i-1}^j) \end{cases} \quad 1 < i \leq n_{\text{pavimentos}} \quad (3.47)$$

em que $\{\Delta\}^j$ é o vetor que contém os deslocamentos relativos de cada edificação ($1 \leq j \leq 2$) e \mathbf{x}_i^j é o vetor de deslocamentos absolutos no tempo calculados em cada pavimento.

A segunda função objetivo é baseada na soma das energias potencial e cinética de cada estrutura. Essa função é nomeada como **ENG**. A estratégia de otimização que é função da capacidade de dissipação de energia pode resultar em sistemas de controle que apresentam uma

melhor performance (Besharatian *et al.*, 2023). Na bibliografia, trabalhos recentes aplicam e indicam essa estratégia para a otimização de sistemas de controle de vibrações de que usam o controle passivo, incluindo DBI e a técnica de acoplamento estrutural (Elias, 2018; Gattulli *et al.*, 2018; Song *et al.*, 2021; De Domenico *et al.*, 2022; Prakash e Jangid, 2022; Rajana *et al.*, 2023; Song *et al.*, 2023).

A soma das energias potencial e cinética de cada estrutura j é determinada por (Song *et al.* (2021):

$$\mathbf{e}_j = \frac{1}{2} \mathbf{m}^j (\dot{\mathbf{x}}^j)^2 + \frac{1}{2} \mathbf{k}^j (\mathbf{x}^j)^2 \quad j = 1, 2. \quad (3.48)$$

E a função objetivo ENG é dada por:

$$\mathbf{f}_{ENG} = \mathbf{e}_1 + \mathbf{e}_2 \quad (3.49)$$

Já a terceira função objetivo é determinada a partir da soma das acelerações máximas absolutas de cada estrutura, e é denominada **ACL**. De Domenico *et al.* (2022) comenta que a aceleração absoluta é um indicador importante na proteção de equipamentos sensíveis a altas frequências e alguns componentes não-estruturais sujeitos à ação sísmica. Alguns estudos que aplicam estratégias baseadas na aceleração são: Pietrosanti *et al.* (2017), Araz (2022) e Djerouni *et al.* (2023).

A função objetivo ACL tem a seguinte forma:

$$\mathbf{f}_{ACL} = \max(\ddot{\mathbf{x}}^1) + \max(\ddot{\mathbf{x}}^2) \quad (3.50)$$

Por fim, na Tabela 3.1 estão apresentadas as propriedades mecânicas que são otimizadas em cada dispositivo bem como os limites mínimos e máximo para essas variáveis. Os limites das características mecânicas de cada dispositivo são embasados nos trabalhos de Peña (2017), Palacios-Quñonero *et al.* (2019), Djerouni *et al.* (2021) e Song *et al.* (2021). Os limites superiores de c e k são baseados nos amortecedores disponíveis no mercado (Taylor Device, Inc.).

Tabela 3.1 – Propriedades mecânicas dos dispositivos e limites para otimização.

Dispositivo	Propriedade mecânica	Grandeza	Limite inferior	Limite superior
VD	c	(Ns.m) x 10 ⁶	0	10
	k	(N/m) x 10 ⁶	0	10
VDI	c	(Ns.m) x 10 ⁶	0	10
	k	(N/m) x 10 ⁶	0	10
	b	(kg) x 10 ⁶	0	1
AIS	c	(Ns.m) x 10 ⁶	0,001	10
	k	(N/m) x 10 ⁶	0,001	10
	b	(kg) x 10 ⁶	0,001	1
AIMS	c	(Ns.m) x 10 ⁶	0,001	10
	k	(N/m) x 10 ⁶	0,001	10
	b	(kg) x 10 ⁶	0,001	1
	m^t	(kg)	$\left(\sum_{i=1}^{n+m} m_i\right) \cdot 0,001$	$\left(\sum_{i=1}^{n+m} m_i\right) \cdot 0,25$

Fonte: Dados da pesquisa.

Os valores de c , k , b são o coeficiente de amortecimento, coeficiente de rigidez e inércia, respectivamente, dos dispositivos; m^t é a massa adicional do AIMS.

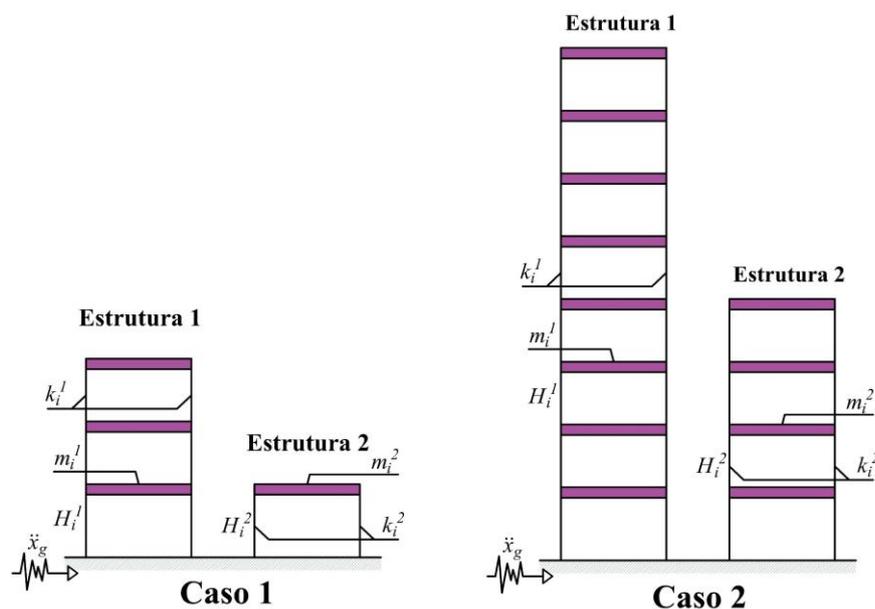
As rotinas de otimização foram programadas pelo autor desse trabalho com base em rotinas já utilizadas anteriormente (Pippi, 2018). Destaca-se que a formulação e programação foram testadas e validadas a partir de trabalhos presentes na bibliografia, principalmente com os modelos matemáticos e resultados obtidos por Palacios-Quñonero *et al.* (2019).

4 ESTUDOS NUMÉRICOS

Nesse capítulo é apresentado um estudo numérico de edifícios acoplados com diferentes dispositivos baseados em *inertor* (DBI). O objetivo desse estudo é verificar a eficiência da técnica de controle de vibrações por acoplamento estrutural na redução das respostas dinâmicas quando o sistema é conectado através de DBI. Também, é investigado o comportamento do sistema para diversos registros de acelerações de sismos. Através dessa análise, serão propostas diretrizes para se obter a melhor efetividade no controle e economia dos amortecedores.

Os modelos estruturais utilizados nos edifícios são do tipo *shear frame* com múltiplos graus de liberdade (MGDL). São considerados dois casos: um caso (Caso 1) com uma estrutura de 3 pavimentos adjacente a uma estrutura de 1 pavimento e outro caso (Caso 2) com uma estrutura contendo 8 pavimentos e uma, adjacente, com 4 pavimentos, conforme ilustrado na Figura 4.1.

Figura 4.1 – Casos de estruturas adjacentes estudados.



Fonte: Elaboração própria.

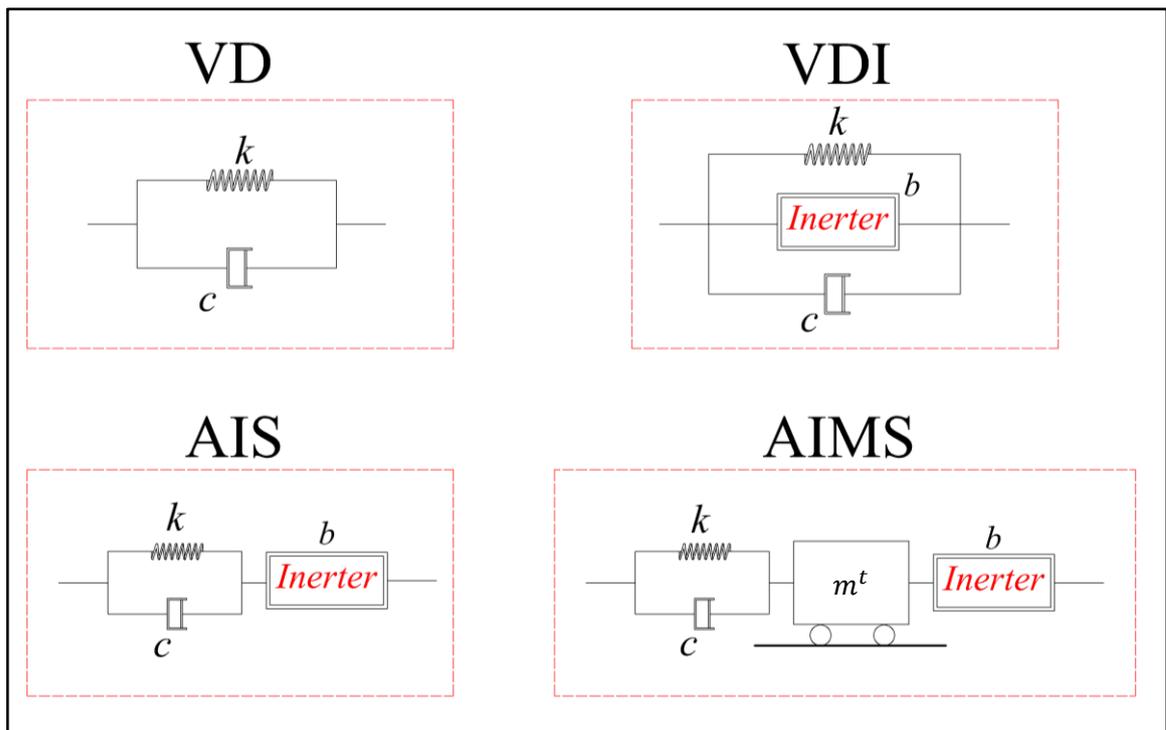
As edificações são fixadas sobre base rígida e possuem as seguintes características: massa por pavimento $m_i^j = 30.000$ kg, altura do pavimento $H_i^j = 3,0$ m e rigidez por pavimento $k_i^j = 12,58$ MN/m. A matriz de amortecimento de cada edificação foi obtida através do método de Rayleigh, utilizando as frequências fundamentais de ambas as estruturas e com a taxa de amortecimento de 2 % (Djerouni *et al.*, 2021).

Os dispositivos aplicados para conexão entre as estruturas adjacentes são:

- Amortecedor Viscoelástico/Viscofluido (VD);
- Amortecedor VD com um elemento *inertor* conectado em paralelo (VDI);
- Amortecedor *Inertor* Sintonizado (AIS);
- Amortecedor *Inertor* de Massa Sintonizado (AIMS).

Na Figura 4.2 estão apresentados os modelos mecânicos dos 4 dispositivos citados.

Figura 4.2 – Dispositivos estudados.



Fonte: Elaboração própria.

Os dispositivos apresentados são largamente estudados na literatura conforme indicado na revisão bibliográfica. No capítulo 3 onde apresenta-se a formulação matemática pertinente pode-se reparar que os dispositivos AIS e AIMS acrescentam 1 grau de liberdade para cada amortecedor adicionado ao sistema, enquanto o VDI não apresenta essa característica. Assim, é possível identificar quais vantagens ou desvantagens pode-se obter com esse aspecto. Também, a comparação com o dispositivo VD é significativa uma vez que amortecedores desse tipo são simples e largamente utilizados na prática.

Para encontrar as propriedades mecânicas ótimas dos dispositivos de conexão é utilizada a otimização por Enxame de Partículas (PSO) em razão de sua boa acurácia e agilidade de execução. São realizadas 30 otimizações com objetivo de reduzir a possibilidade de mínimos

locais. As propriedades escolhidas são uma média das 30 análises. Os coeficientes de variação de cada análise são apresentados nos resultados. Os parâmetros para algoritmo PSO são os mesmos utilizados em Palacios-Quiñonero *et al.* (2019), sendo 75 partículas e com máximo de 200 iterações. Foram realizadas simulações para garantir que os parâmetros aplicados apresentassem resultados rápidos e com uma boa acurácia. No APÊNDICE A estão apresentados os resultados das 30 otimizações de cada análise.

São consideradas três funções objetivo distintas. A primeira função objetivo (DRP) é baseada no desvio padrão do deslocamento relativo entre pavimentos, conforme descrita na Eq. (3.46). A segunda função objetivo (ENG) é uma soma das energias totais de cada estrutura, descrito na Eq. (3.49). Já a terceira função objetivo (ACL) emprega a soma do desvio padrão das acelerações máximas absolutas de cada estrutura, conforme mostra a Eq. (3.50).

Como forma de averiguar os resultados obtidos pelo algoritmo PSO, as análises de otimização foram verificadas utilizando o Algoritmo de Otimização Inspirado em Círculo (CIOA), desenvolvido por De Souza e Miguel (2022), e o Algoritmo de Enxame de Partículas Multiobjetivo (MOPSO). Os resultados não são expressos nesse trabalho, porém, confirmam os valores obtidos.

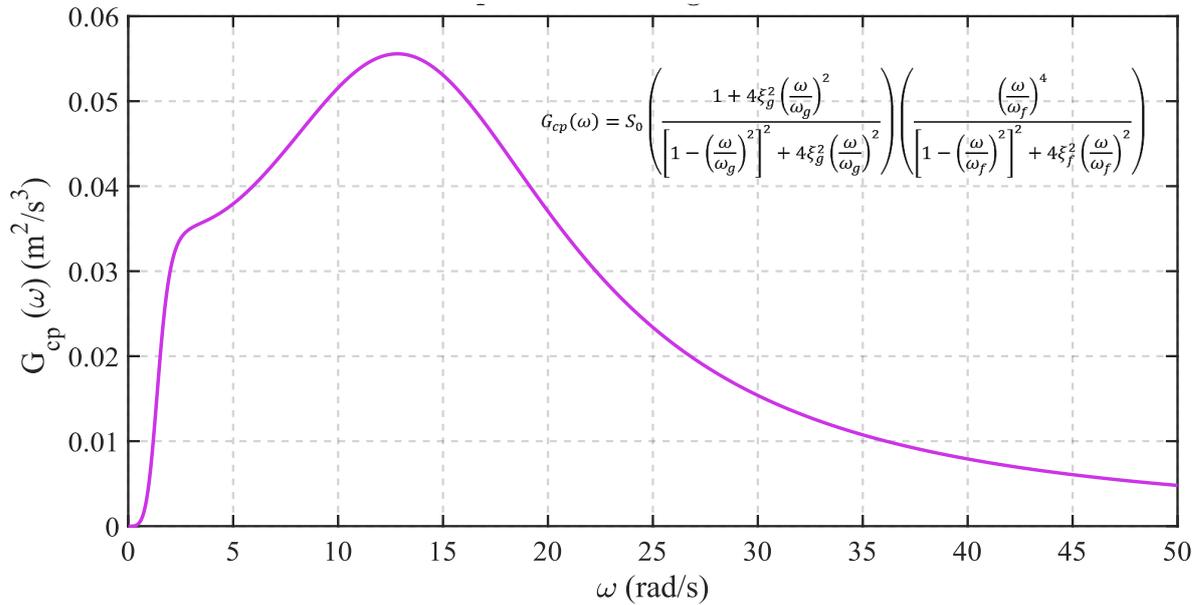
Conforme já comentando, a excitação do sistema é estabelecida por um processo aleatório de ruído branco de média zero. A uma função densidade espectral de potência de intensidade (FDEP) aplicada é apresentada em Clough e Penzien (2003) e têm as propriedades descritas na Figura 4.1. As características do solo empregadas são referenciadas por: Heredia-Zavoni e Vanmarcke (1995), Deodatis (1996), Xu *et al.* (1999), Liu *et al.* (2016), Chen, J. *et al.* (2017), Wen *et al.* (2022), Wen e Hui (2022), Wang, Shen, Zhu e Luo (2023) e Zhang, Y. L. *et al.* (2023). É importante destacar que esses valores refletem condições de solo firme. Para a intensidade do processo aleatório foi utilizado o valor de $S_0 = 4,794 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}^3$. Segundo Clough e Penzien (2003), esse valor representa, aproximadamente, a componente NS do sismo de El Centro. Na Figura 4.3 é apresentado o espectro fazendo uso dos parâmetros descritos.

Tabela 4.1 – Parâmetros de solo para FDEP.

ω_g (rad/s)	ξ_g	ω_f	ξ_f (rad/s)
5π	0.6	0.5π	0.6

Fonte: Bibliografia citada.

Figura 4.3 – Espectro de Clough e Penzien aplicado nas análises.



Fonte: Elaboração própria.

Assim, a análise de otimização, para obtenção dos parâmetros ótimos dos dispositivos, é realizada no domínio da frequência. Por sua vez, a verificação da eficiência do sistema otimizado, aplicando os registros de acelerações sísmicas, é realizada no domínio do tempo.

Os parâmetros dos dispositivos obtidos na análise de otimização são considerados no sistema sob ação externa dos registros de acelerações dos sismos de El Centro de 1940, Kobe de 1995 e Northridge de 1994. Assim, são obtidas as respostas dinâmicas das estruturas no domínio do tempo. Os dados dos sismos foram obtidos a partir do banco de dados do *Pacific Earthquake Engineering Research Center – PEER* (Peer, 2013).

Na Tabela 4.2 estão apresentadas as principais características desses sismos, onde: PGA é a aceleração pico efetiva, M é a magnitude do abalo sísmico e Dss é a distância do local de medida ao epicentro.

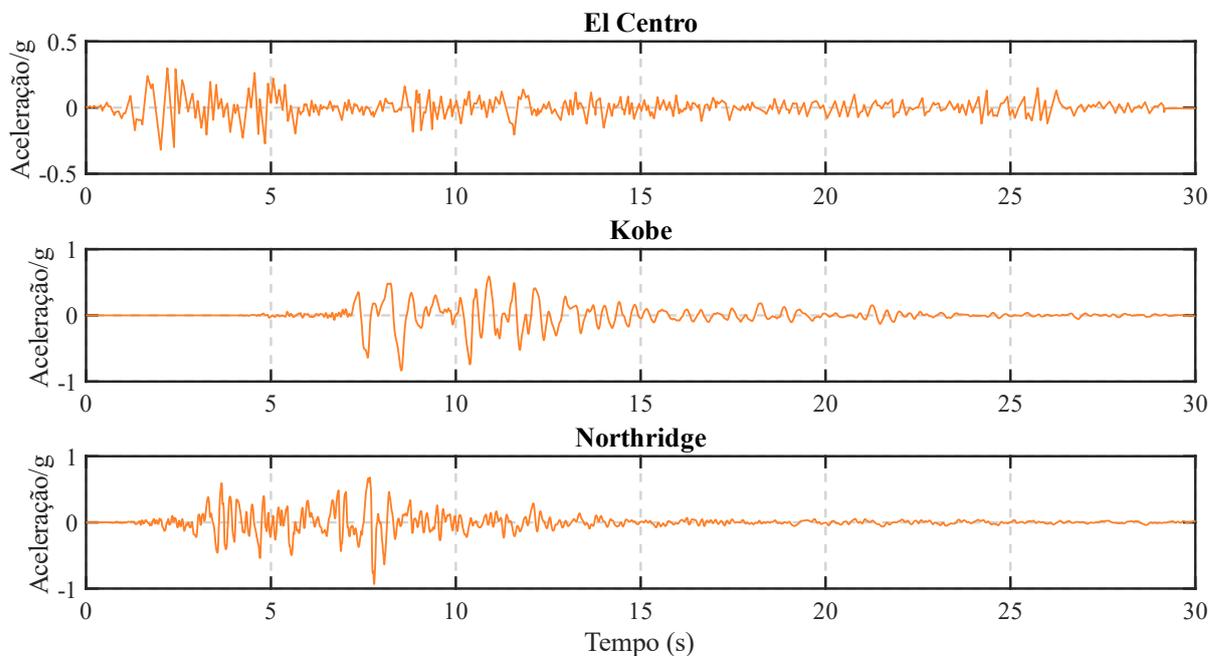
Tabela 4.2 – Características dos sismos principais.

Sismo	Estação	PGA (g)	M	Dss (km)
El Centro	Irrigation District substation	0,314	6,5	6,09
Kobe	OKJMA	0,821	6,9	0,60
Northridge	360LA – Supulveda Hospital	0,932	6,7	8,44

Fonte: PEER Ground Motion Database, 2013

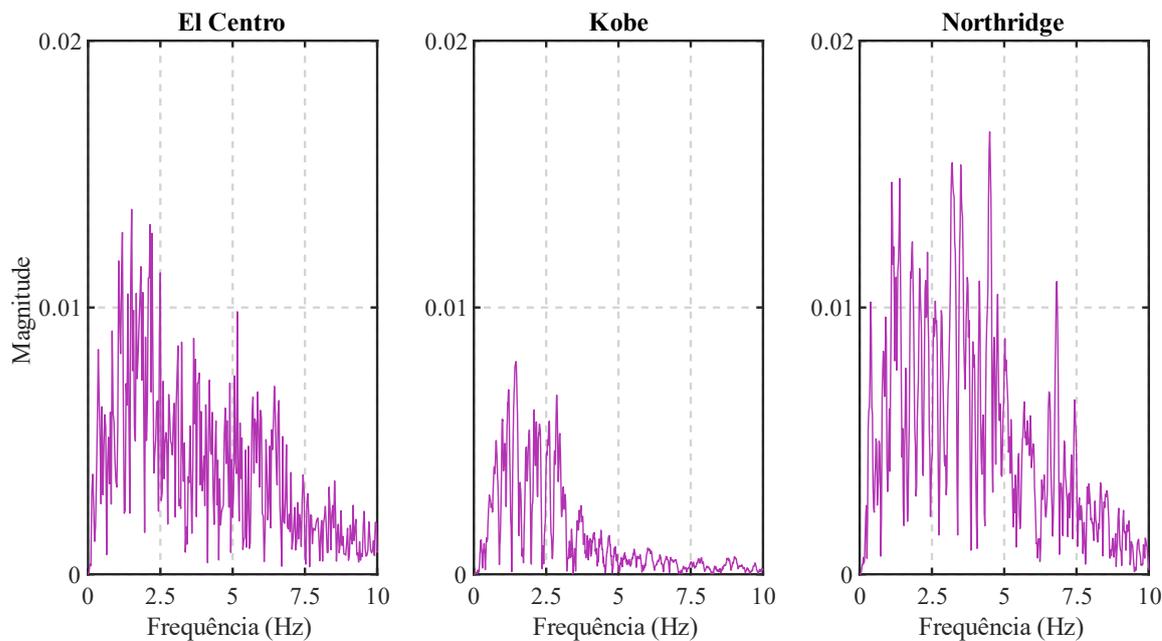
Na Figura 4.4 apresentam-se os registros de acelerações dos três sismos. A faixa de frequências dominantes desses terremotos varia entre 0,60 e 5,00 Hz. Os espectros de frequência correspondentes estão apresentados na Figura 4.5.

Figura 4.4 – Registro de acelerações horizontais dos sismos.



Fonte: Elaboração própria.

Figura 4.5 – Espectros de frequência dos sismos.



Fonte: Elaboração própria.

Com objetivo de verificar a eficiência do sistema otimizado, serão empregados ainda os 100 registros de aceleração de 50 sismos (obtidos no *PEER*) para determinar se há redução ou

amplificação das respostas dinâmicas quando o sistema acoplado é submetido a diferentes solicitações. No ANEXO A estão apresentados os dados de cada registro sísmico.

Para quantificar o aumento ou atenuação das respostas dinâmicas das estruturas, aplica-se a seguinte razão:

$$r_i^{resp} = \frac{v_i^{nc}}{v_i^{ac}} \quad (4.1)$$

Em que r_i^{resp} é a razão da resposta dinâmica *resp* (deslocamento, aceleração etc.) para a estrutura *i*; v^{nc} é a resposta da estrutura para o sistema não acoplado e v^{ac} a resposta da estrutura para o sistema acoplado ($i = 1, 2$). Para razões $r_i > 1$ há uma ampliação na resposta dinâmica da estrutura e, caso $r_i < 1$, verifica-se uma redução nessa resposta.

Nas tabelas com diferença percentual de valores, a seguinte equação é aplicada:

$$diferença \% = \frac{(v^{nc} - v^{ac})}{v^{nc}} \quad (4.2)$$

onde v^{nc} é a resposta para o sistema não acoplado e v^{ac} a resposta para o sistema acoplado. Caso a diferença percentual seja positiva, há uma redução dessa resposta. Por outro lado, para diferenças negativas, há uma ampliação da resposta no sistema acoplado em comparação ao sistema não acoplado.

Por fim, durante a discussão dos resultados são apresentadas notas que expressam as principais conclusões da análise em foco. As notas são numeradas sequencialmente e aparecem em destaque ao longo do texto.

4.1 CASO 1 – ESTRUTURA DE 3 PAVIMENTOS – ESTRUTURA DE 1 PAVIMENTO

Para o Caso 1 (Figura 4.1) as frequências fundamentais de cada estrutura estão apresentadas na Tabela 4.3.

Tabela 4.3 – Frequências fundamentais das estruturas adjacentes – Caso 1.

Estrutura	Frequência (Hz)
1 (3 Pavimentos)	1,450
2 (1 Pavimentos)	3,259

Fonte: Dados da pesquisa.

As médias, desvios-padrão e coeficientes de variação (CV) dos resultados das análises de otimização para o Caso 1 estão apresentadas nas Tabela 4.4 (DRP), Tabela 4.5 (ENG) e Tabela 4.6 (ACL). São apresentados os valores dos parâmetros mecânicos de cada dispositivo estudado (VD, VDI, AIS e AIMS), os valores da função objetivo (f_{obj}), o tempo médio de execução (t_{med}) e o desvio padrão dos deslocamentos relativos máximos entre pavimentos da Estrutura 1 (d_1) e da Estrutura 2 (d_2). Para o sistema não acoplado: $d_1 = 0,0154$ m e $d_2 = 0,0072$ m.

Tabela 4.4 – Resultados da análise de otimização DRP – Caso 1.

Dispositivo	Parâmetro	Resultados							
		c (Ns/m)	k (N/m)	b (kg)	m^t (kg)	f_{obj} (m ²)	t_{med} (s)	d_1 (m)	d_2 (m)
VD _{DRP}	Média	6,54E+05	0			0,000167	2,16	0,0074	0,0049
	Desvio Padrão	3,88E+02	0			3,11E-10	1,26E-01	1,07E-03	9,94E-04
	CV (%)	0,06%	0			0,00%	5,85%	14,4%	20,5%
VDI _{DRP}	Média	4,59E+05	0	4,57E+04		0,000128	3,07	0,0057	0,0057
	Desvio Padrão	7,41E+02	0	3,32E+01		1,13E-09	3,57E-01	2,88E-04	7,66E-04
	CV (%)	0,16%	0	0,07%		0,00%	11,6%	5,06%	13,3%
AIS _{DRP}	Média	9,37E+05	1,20E+06	8,98E+04		0,000127	3,32	0,0058	0,0054
	Desvio Padrão	1,61E+04	4,68E+05	3,97E+03		6,61E-08	6,01E-01	2,52E-04	7,75E-05
	CV (%)	1,72%	39,1%	4,43%		0,05%	18,1%	4,36%	1,45%
AIMS _{DRP}	Média	9,03E+05	2,63E+03	1,01E+05	9,18E+02	0,000128	4,19	0,0060	0,0054
	Desvio Padrão	4,05E+04	1,01E+03	7,13E+02	4,00E+01	3,18E-07	7,04E-01	6,00E-04	4,46E-04
	CV (%)	4,48%	38,5%	0,71%	4,36%	0,25%	16,8%	10,0%	8,24%

Fonte: Dados da pesquisa.

Tabela 4.5 – Resultados da análise de otimização ENG – Caso 1.

Dispositivo	Parâmetro	Resultados							
		c (Ns/m)	k (N/m)	b (kg)	m^t (kg)	f_{obj} (m ²)	t_{med} (s)	d_1 (m)	d_2 (m)
VD _{ENG}	Média	5,69E+05	0			1,24E+03	6,97	0,0068	0,0042
	Desvio Padrão	1,49E+02	0			2,48E-03	8,19E-01	3,28E-07	3,44E-07
	CV (%)	0,03%	0			0,00%	11,8%	0,00%	0,01%
VDI _{ENG}	Média	4,30E+05	0	3,78E+04		1,02E+03	5,56	0,0059	0,0053
	Desvio Padrão	1,13E-02	0	1,22E-03		5,09E-12	5,17E-01	4,35E-11	7,04E-11
	CV (%)	0,00%	0	0,00%		0,00%	9,30%	0,00%	0,00%
AIS _{ENG}	Média	7,12E+05	2,59E+06	6,57E+04		9,76E+02	6,70	0,0060	0,0050
	Desvio Padrão	2,37E+04	2,55E+05	2,42E+03		4,32E-01	1,00E+00	1,37E-05	1,98E-05
	CV (%)	3,33%	9,84%	3,68%		0,04%	14,9%	0,23%	0,39%
AIMS _{ENG}	Média	6,20E+05	3,19E+06	5,77E+04	6,96E+03	9,67E+02	8,11	0,0061	0,0051
	Desvio Padrão	1,62E+04	9,67E+04	1,41E+03	1,14E+03	1,29E+00	1,45E+00	1,86E-05	5,11E-06
	CV (%)	2,62%	3,03%	2,45%	16,3%	0,13%	17,9%	0,30%	0,10%

Fonte: Dados da pesquisa.

Tabela 4.6 – Resultados da análise de otimização ACL – Caso 1.

Dispositivo	Parâmetro	Resultados							
		c (Ns/m)	k (N/m)	b (kg)	m^t (kg)	f_{obj} (m ²)	t_{med} (s)	d_1 (m)	d_2 (m)
VD _{ACL}	Média	3,52E+05	0			3,160	4,85	0,0076	0,0037
	Desvio Padrão	3,61E+01	0			1,99E-06	1,13E+00	4,24E-05	1,85E-05
	CV (%)	0,01%	0			0,00%	23,4%	0,56%	0,50%
VDI _{ACL}	Média	3,19E+05	0	1,19E+04		3,014	5,12	0,0074	0,0039
	Desvio Padrão	1,56E-02	0	1,98E-03		8,97E-09	3,71E-01	2,46E-07	8,82E-08
	CV (%)	0,00%	0	0,00%		0,00%	7,25%	0,00%	0,00%
AIS _{ACL}	Média	2,24E+05	2,98E+06	3,00E+04		2,892	6,07	0,0072	0,0045
	Desvio Padrão	2,24E+02	4,64E+03	2,55E+01		1,08E-14	8,07E-01	4,09E-06	3,23E-06
	CV (%)	0,10%	0,16%	0,09%		0,00%	13,3%	0,06%	0,07%
AIMS _{ACL}	Média	6,44E+05	1,01E+03	6,76E+04	2,13E+04	2,725	8,05	0,0067	0,0056
	Desvio Padrão	9,11E+04	4,71E+01	6,35E+02	1,88E+03	7,94E-02	9,34E-01	4,01E-05	1,32E-04
	CV (%)	14,2%	4,67%	0,94%	8,84%	2,91%	11,6%	0,60%	2,35%

Fonte: Dados da pesqu

• Análise de otimização DRP

A análise de otimização DRP exibiu baixos valores de coeficiente de variação (CV), o que indica uma boa convergência nos resultados. Inicialmente, é importante destacar que o dispositivo VD_{DRP} tem o coeficiente de rigidez igual a zero, o que caracteriza um amortecedor do tipo viscofluido. Observa-se uma ampliação nos valores de CV quando se insere o elemento *inertor* à conexão. Isso ocorre devido ao aumento da complexidade do dispositivo que traz mais possibilidades para os parâmetros ótimos.

Nos dispositivos VD_{DRP} e VDI_{DRP} percebe-se que a inserção do elemento *inertor* resultou na redução no seu coeficiente de amortecimento. Também, obtém-se um valor menor na função objetivo. Já comparando o dispositivo VD_{DRP} em relação aos dispositivos AIS_{DRP} e $AIMS_{DRP}$, é possível notar um aumento no coeficiente de amortecimento e a necessidade de aplicação de rigidez à ligação. Como vantagem, nos DBI é possível obter uma maior atenuação no valor de d_1 (22 % menor), também alcançada com o uso do dispositivo VDI_{DRP} .

Um comportamento observado é que os dispositivos baseados em *inertor* (DBI) resultam em uma redução mais acentuada nos deslocamentos relativos da estrutura mais flexível (Estrutura 1). Por sua vez, a atenuação na estrutura mais rígida (Estrutura 2) é menor.

O dispositivo AIS é um caso específico do AIMS quando m_t é igual zero. Nos resultados da otimização DRP, verifica-se que o $AIMS_{DRP}$ concebe um amortecedor com um coeficiente de rigidez consideravelmente menor que o obtido para o AIS_{DRP} . Por sua vez, é necessário o acréscimo de massa na Estrutura 1.

• Análise de otimização ENG

Na análise de otimização baseada em energia o comportamento dos dispositivos foi análogo ao obtido na análise DRP. Entretanto, os parâmetros mecânicos dos amortecedores encontrados pela análise ENG foram menores. Os desvios padrões dos deslocamentos relativos máximos das Estruturas 1 e 2 também são inferiores. Por sua vez, isso indica que a otimização baseada na soma das energias totais das estruturas conectadas produz, supostamente, dispositivos mais econômicos.

O sistema acoplado com o dispositivo $AIMS_{ENG}$ foi o que obteve a menor energia total. Assim como no $AIMS_{DRP}$, o coeficiente de amortecimento foi menor e o coeficiente de rigidez maior que o estabelecido para o dispositivo AIS. Entretanto, a inércia do $AIMS_{ENG}$ é menor que obtida para o dispositivo AIS_{ENG} .

Um ponto a ser destacado é a redução do CV dos resultados em relação à análise DRP. Nota-se que a análise ENG é mais consistente para determinar os parâmetros ótimos dos dispositivos. Um fator negativo é o tempo de execução médio do algoritmo, podendo ser até três vezes mais lento.

• **Análise de otimização ACL**

A análise de otimização ACL resultou nos menores valores de parâmetros mecânicos dos dispositivos em relação às análises DRP e ENG. Também, a análise ACL apresentou baixos valores de CV e um tempo de execução médio sendo o dobro da análise DRP.

Diferentemente do comportamento apresentado nas análises DRP e ENG, o coeficiente de amortecimento do dispositivo AIS_{ACL} resultou em um menor valor do que o obtido no dispositivo VDI_{ACL}. Outro fator a se observar é que os valores de d_1 e d_2 são bastante próximos entre os dispositivos VD_{ACL} e VDI_{ACL}. Sendo o DBI um sistema simples e pouco oneroso, essa ocorrência indica que o elemento *inertor* pode reduzir o coeficiente de amortecimento do elemento de conexão entre as estruturas.

<i>Nota 1</i>	
➤	A estrutura mais flexível apresenta mais vantagens no sistema acoplado.
➤	A função objetivo baseada na energia concebe uma otimização mais estável.
➤	Há uma tendência de os DBI resultarem em dispositivos com coeficientes mecânicos menores.

Na Tabela 4.7 são apresentadas a diferença entre o desvio padrão do deslocamento relativo máximo entre pavimentos para o sistema não acoplado e acoplado com os parâmetros obtidos em cada otimização no Caso 1. O desvio padrão do deslocamento relativo máximo entre pavimentos para sistema não acoplado na Estrutura 1 é $d_1 = 0,0154$ m e para Estrutura 2 é $d_2 = 0,0072$ m.

Tabela 4.7 – Diferença dos valores de d_1 e d_2 para o Caso 1.

Dispositivo	Análise	Diferença d_1 (%)	Diferença d_2 (%)
VD	DRP	59,3%	56,4%
	ENG	55,7%	41,0%
	ACL	50,4%	48,2%

VDI	DRP	63,0%	20,2%
	ENG	61,6%	27,1%
	ACL	52,1%	45,8%
AIS	DRP	62,4%	25,6%
	ENG	60,8%	30,0%
	ACL	53,3%	36,9%
AIMS	DRP	61,1%	24,8%
	ENG	60,2%	29,5%
	ACL	56,8%	21,9%

Fonte: Dados da pesquisa.

Na redução do deslocamento relativo máximo entre pavimentos, os DBI foram mais eficientes quando comparados ao dispositivo VD. A atenuação da estrutura mais flexível fica mais evidente para todos os dispositivos e análises. Para a estrutura mais rígida (Estrutura 2), a otimização baseada em aceleração foi mais eficiente.

Para ilustrar melhor os resultados alcançados, na Tabela 4.8 são evidenciadas as respostas máximas absolutas de deslocamento, velocidade e aceleração para ambas as estruturas submetidas aos sismos de El Centro, considerando a média dos parâmetros ótimos determinados em cada análise. Na Tabela 4.9 são exibidos os valores de *rms* (*root mean square*) máximos.

Tabela 4.8 – Respostas dinâmicas máximas absolutas do Caso 1 – El Centro.

Disp.	Resposta	Estr.	Resultados máximos absolutos				Diferença (%)		
			Não Acopl.	Acopl. DRP	Acopl. ENG	Acopl. ACL			
VD	x (m)	1	0,103	0,085	0,084	0,084	18%	18%	19%
		2	0,021	0,023	0,022	0,018	-9,4%	-4,3%	13%
	\dot{x} (m/s)	1	0,886	0,949	0,924	0,851	-7,1%	-4,3%	3,9%
		2	0,439	0,311	0,306	0,284	29%	30%	35%
	\ddot{x} (m/s²)	1	9,383	9,378	9,239	8,898	0,1%	1,5%	5,2%
		2	8,777	6,183	6,044	5,718	30%	31%	35%
VDI	x (m)	1	0,103	0,074	0,073	0,079	29%	29%	23%
		2	0,021	0,032	0,029	0,021	-50%	-40%	2,3%
	\dot{x} (m/s)	1	0,886	0,872	0,843	0,823	1,5%	4,8%	7,1%
		2	0,439	0,433	0,419	0,319	1,2%	4,6%	27%
	\ddot{x} (m/s²)	1	9,383	9,341	8,671	8,583	0,5%	7,6%	8,5%
		2	8,777	6,163	5,929	5,783	30%	32%	34%

 AIS 	 x (m) 	1	0,103	0,074	0,074	0,076	28%	29%	26%
		2	0,021	0,029	0,027	0,021	-39%	-28%	0,3%
	 \dot{x} (m/s) 	1	0,886	0,854	0,818	0,769	3,6%	7,6%	13%
		2	0,439	0,409	0,396	0,338	6,8%	10%	23%
	 \ddot{x} (m/s²) 	1	9,383	8,638	8,068	8,049	7,9%	14%	14%
		2	8,777	5,725	5,889	5,960	35%	33%	32%
 AIMS 	 x (m) 	1	0,103	0,074	0,073	0,072	28%	29%	30%
		2	0,021	0,029	0,026	0,033	-36%	-25%	-55%
	 \dot{x} (m/s) 	1	0,886	0,847	0,780	0,742	4,4%	12%	16%
		2	0,439	0,408	0,391	0,433	7,0%	11%	1,3%
	 \ddot{x} (m/s²) 	1	9,383	8,540	7,515	7,478	9,0%	20%	20%
		2	8,777	5,701	5,826	6,679	35%	34%	24%

Fonte: Dados da pesquisa.

Para o caso de carregamento do sismo de El Centro, observa-se um aumento no deslocamento absoluto máximo da Estrutura 2 nas análises DRP e ENG. Apenas na análise ACL é possível obter reduções no deslocamento na Estrutura 2 (VD ou VDI). Assim, a estrutura com uma rigidez considerável não se beneficia com a técnica de acoplamento, conforme já observado por Peña (2017). Um maior equilíbrio na atenuação simultânea das respostas dinâmicas absolutas é obtido com a função objetivo ACL.

Já nas respostas *rms* máximas há tendência de redução simultânea nas respostas das duas estruturas adjacentes. O elemento *inertor* reduziu o desempenho no controle dos deslocamentos na Estrutura 2, porém, melhorou a performance do sistema para reduzir os valores de *rms* máximo dos deslocamentos na Estrutura 1.

Tabela 4.9 – Respostas *rms* máximas do Caso 1 – El Centro.

Disp.	Resposta	Estr.	Resultados <i>rms</i> máximos				Diferença (%)		
			Não Acopl.	Acopl. DRP	Acopl. ENG	Acopl. ACL			
 VD 	 x (m) 	1	0,035	0,018	0,018	0,019	50%	50%	46%
		2	0,0054	0,0045	0,0043	0,004	17%	20%	32%
	 \dot{x} (m/s) 	1	0,327	0,177	0,177	0,184	46%	46%	44%
		2	0,108	0,062	0,060	0,054	42%	44%	50%
	 \ddot{x} (m/s²) 	1	3,020	1,928	1,897	1,872	36%	37%	38%
		2	2,271	1,293	1,267	1,189	43%	44%	48%

VDI	x (m)	1	0,035	0,014	0,014	0,017	62%	61%	51%
		2	0,0054	0,0057	0,0053	0,004	-6%	1,5%	29%
	\dot{x} (m/s)	1	0,327	0,143	0,142	0,167	56%	56%	49%
		2	0,108	0,076	0,072	0,054	29%	33%	50%
	\ddot{x} (m/s²)	1	3,020	1,785	1,743	1,770	41%	42%	41%
		2	2,271	1,446	1,395	1,151	36%	39%	49%
AIS	x (m)	1	0,035	0,014	0,014	0,015	61%	61%	56%
		2	0,0054	0,0055	0,0051	0,004	-1,3%	5,5%	18%
	\dot{x} (m/s)	1	0,327	0,141	0,139	0,145	57%	57%	56%
		2	0,108	0,071	0,067	0,060	34%	38%	44%
	\ddot{x} (m/s²)	1	3,020	1,678	1,611	1,502	44%	47%	50%
		2	2,271	1,359	1,310	1,224	40%	42%	46%
AIMS	x (m)	1	0,035	0,014	0,014	0,014	61%	61%	59%
		2	0,0054	0,0054	0,0051	0,005	0,3%	6,4%	0,7%
	\dot{x} (m/s)	1	0,327	0,141	0,136	0,138	57%	58%	58%
		2	0,108	0,070	0,063	0,066	35%	42%	39%
	\ddot{x} (m/s²)	1	3,020	1,657	1,471	1,390	45%	51%	54%
		2	2,271	1,331	1,135	1,092	41%	50%	52%

Fonte: Dados da pesquisa.

Os valores de deslocamento relativo máximo entre pavimentos (Δ) para o sismo de El Centro estão apresentados na Tabela 4.10.

Tabela 4.10 – Deslocamento relativo máximo entre pavimentos do Caso 1 – El Centro.

Disp.	Estr.	Δ_{nc}	Δ_{acopl} DRP	Δ_{acopl} ENG	Δ_{acopl} ACL	Diferença (%)		
VD	1	0,0464	0,0357	0,0364	0,0350	23%	22%	24%
	2	0,0210	0,0221	0,0230	0,0182	-5,1%	-9,4%	13%
VDI	1	0,0464	0,0378	0,0327	0,0338	18%	30%	27%
	2	0,0210	0,0306	0,0315	0,0206	-46%	-50%	2,3%
AIS	1	0,0464	0,0354	0,0324	0,0305	24%	30%	34%
	2	0,0210	0,0254	0,0292	0,0211	-21%	-39%	-0,3%
AIMS	1	0,0464	0,0353	0,0322	0,0300	24%	31%	35%
	2	0,0210	0,0269	0,0287	0,0325	-28%	-36%	-55%

Fonte: Dados da pesquisa.

Nos valores de Δ , os DBI não concederam vantagens na atenuação para o sismo de El Centro, especialmente para o sistema acoplado com o dispositivo AIMS.

Considerando o sismo Kobe, as respostas dinâmicas absolutas máximas estão exibidas na Tabela 4.11. As respostas *rms* máximas são apresentadas na Tabela 4.12.

Tabela 4.11 – Respostas dinâmicas máximas absolutas do Caso 1 – Kobe.

Disp.	Resposta	Estr.	Resultados máximos absolutos				Diferença (%)		
			Não Acopl.	Acopl. DRP	Acopl. ENG	Acopl. ACL			
VD	x (m)	1	0,472	0,204	0,210	0,242	57%	55%	49%
		2	0,051	0,059	0,058	0,052	-16%	-13%	-1,9%
	\dot{x} (m/s)	1	4,360	2,024	2,043	2,184	54%	53%	50%
		2	0,828	0,703	0,683	0,664	15%	18%	20%
	\ddot{x} (m/s ²)	1	38,416	24,849	25,143	26,393	35%	35%	31%
		2	21,381	16,232	15,873	14,952	24%	26%	30%
VDI	x (m)	1	0,472	0,190	0,193	0,217	60%	59%	54%
		2	0,051	0,067	0,063	0,049	-32%	-23%	3%
	\dot{x} (m/s)	1	4,360	1,902	1,909	2,037	56%	56%	53%
		2	0,828	0,754	0,731	0,642	9,0%	12%	23%
	\ddot{x} (m/s ²)	1	38,416	21,128	21,314	24,746	45%	45%	36%
		2	21,381	17,408	16,573	13,526	19%	22%	37%
AIS	x (m)	1	0,472	0,193	0,201	0,221	59%	58%	53%
		2	0,051	0,065	0,062	0,058	-27%	-22%	-14%
	\dot{x} (m/s)	1	4,360	1,857	1,911	2,119	57%	56%	51%
		2	0,828	0,745	0,736	0,668	10%	11%	19%
	\ddot{x} (m/s ²)	1	38,416	20,008	19,678	18,702	48%	49%	51%
		2	21,381	17,096	16,478	15,885	20%	23%	26%
AIMS	x (m)	1	0,472	0,194	0,208	0,225	59%	56%	52%
		2	0,051	0,065	0,062	0,068	-27%	-21%	-35%
	\dot{x} (m/s)	1	4,360	1,867	1,903	2,080	57%	56%	52%
		2	0,828	0,744	0,721	0,791	10%	13%	4,5%
	\ddot{x} (m/s ²)	1	38,416	19,895	17,221	18,232	48%	55%	53%
		2	21,381	16,819	14,361	12,865	21%	33%	40%

Fonte: Dados da pesquisa.

No sismo de Kobe, a Estrutura 1 resultou em atenuações nas respostas absolutas significativamente maiores que aquelas obtidas no sismo de El Centro. Na Estrutura 2, verifica-se que os deslocamentos máximos absolutos são também afetados negativamente com o acoplamento estrutural. A eficiência do controle, obtida por cada análise otimização foi similar, com os dispositivos DBI sendo mais eficazes.

Tabela 4.12 – Respostas *rms* máximas do Caso 1 – Kobe.

Disp.	Resposta	Estr.	Resultados <i>rms</i> máximos				Diferença (%)		
			Não Acopl.	Acopl. DRP	Acopl. ENG	Acopl. ACL			
VD	x (m)	1	0,064	0,021	0,022	0,025	67%	66%	61%
		2	0,0043	0,0049	0,0048	0,004	-14%	-11%	0,3%
	\dot{x} (m/s)	1	0,581	0,198	0,202	0,231	66%	65%	60%
		2	0,079	0,053	0,052	0,049	33%	34%	38%
	\ddot{x} (m/s ²)	1	5,324	2,059	2,083	2,274	61%	61%	57%
		2	1,802	1,085	1,081	1,086	40%	40%	40%
VDI	x (m)	1	0,064	0,016	0,017	0,023	75%	73%	64%
		2	0,0043	0,0060	0,0057	0,004	-40%	-33%	-4,8%
	\dot{x} (m/s)	1	0,581	0,157	0,162	0,211	73%	72%	64%
		2	0,079	0,067	0,063	0,050	16%	20%	36%
	\ddot{x} (m/s ²)	1	5,324	1,731	1,743	2,089	67%	67%	61%
		2	1,802	1,135	1,112	1,049	37%	38%	42%
AIS	x (m)	1	0,064	0,016	0,016	0,019	75%	74%	70%
		2	0,0043	0,0058	0,0056	0,005	-36%	-30%	-19%
	\dot{x} (m/s)	1	0,581	0,151	0,154	0,170	74%	73%	71%
		2	0,079	0,062	0,060	0,056	21%	24%	29%
	\ddot{x} (m/s ²)	1	5,324	1,639	1,629	1,661	69%	69%	69%
		2	1,802	1,114	1,102	1,126	38%	39%	38%
AIMS	x (m)	1	0,064	0,016	0,017	0,018	75%	74%	71%
		2	0,0043	0,0058	0,0057	0,006	-35%	-33%	-45%
	\dot{x} (m/s)	1	0,581	0,153	0,154	0,170	74%	73%	71%
		2	0,079	0,062	0,061	0,072	21%	22%	8,6%
	\ddot{x} (m/s ²)	1	5,324	1,650	1,601	1,682	69%	70%	68%
		2	1,802	1,119	1,115	1,216	38%	38%	33%

Fonte: Dados da pesquisa.

O dispositivo VDI_{ACL} foi o único que apresentou redução no deslocamento máximo absoluto na Estrutura 2.

Na atenuação das respostas *rms* máximas da Estrutura 1 a técnica de controle por acoplamento estrutural mostrou-se satisfatória. Foi possível obter reduções de até 75 % no *rms* dos deslocamentos para a Estrutura 1 com o uso de DBI. Assim como nos deslocamentos máximos absolutos da Estrutura 2, ocorreu um aumento nas respostas *rms* máximo dos deslocamentos. Tanto para o sismo de Kobe quanto para o sismo de El Centro, o sistema acoplado com o dispositivo VD é mais favorável à Estrutura 2 em relação aos deslocamentos. Na Tabela 4.13 são apresentados os valores de Δ para o sistema sob ação do sismo de Kobe.

Tabela 4.13 – Deslocamento relativo máximo entre pavimentos do Caso 1 – Kobe.

Disp.	Estr.	Δ_{nc}	Δ_{acopl} DRP	Δ_{acopl} ENG	Δ_{acopl} ACL	Diferença (%)		
VD	1	0,2135	0,0865	0,0882	0,0967	60%	59%	55%
	2	0,0509	0,0589	0,0576	0,0518	-16%	-13%	-1,9%
VDI	1	0,2135	0,0773	0,0791	0,0900	64%	63%	58%
	2	0,0509	0,0669	0,0627	0,0494	-32%	-23%	3,0%
AIS	1	0,2135	0,0854	0,0910	0,1049	60%	57%	51%
	2	0,0509	0,0646	0,0623	0,0581	-27%	-22%	-14%
AIMS	1	0,2135	0,0857	0,0947	0,1018	60%	56%	52%
	2	0,0509	0,0648	0,0617	0,0685	-27%	-21%	-35%

Fonte: Dados da pesquisa.

Na Estrutura 1 foi possível alcançar até 64 % de redução nos deslocamentos relativos máximos. Novamente, o dispositivo AIMS apresentou-se menos favorável para a Estrutura 2.

Nota 2

- Para os sismos de El Centro e Kobe, a função objetivo baseada nas acelerações leva a um sistema em que é possível a redução simultânea das respostas máximas absolutas das estruturas acopladas.
- O dispositivo VD revelou-se mais benéfico para a estrutura mais rígida.
- Os DBI melhoram o desempenho de controle da estrutura mais flexível.

Nas Tabela 4.14, Tabela 4.15 e Tabela 4.16 estão exibidas as respostas máximas absolutas, respostas de *rms* máximos e deslocamentos máximos entre pavimentos, respectivamente, para as estruturas submetidas às acelerações do sismo de Northridge.

Tabela 4.14 – Respostas dinâmicas máximas absolutas do Caso 1 – Northridge.

Disp.	Resposta	Estr.	Resultados máximos absolutos				Diferença (%)		
			Não Acopl.	Acopl. DRP	Acopl. ENG	Acopl. ACL			
VD	x (m)	1	0,206	0,141	0,142	0,151	31%	31%	27%
		2	0,100	0,047	0,047	0,045	53%	53%	55%
	\dot{x} (m/s)	1	1,759	1,621	1,624	1,666	7,9%	7,7%	5,3%
		2	2,071	0,763	0,754	0,746	63%	64%	64%
	\ddot{x} (m/s ²)	1	22,143	21,735	21,583	21,537	1,8%	2,5%	2,7%
		2	41,883	16,680	16,697	16,979	60%	60%	59%
VDI	x (m)	1	0,206	0,143	0,142	0,146	31%	31%	29%
		2	0,100	0,059	0,054	0,042	41%	45%	58%
	\dot{x} (m/s)	1	1,759	1,768	1,759	1,656	-0,5%	0,0%	5,9%
		2	2,071	0,711	0,650	0,660	66%	69%	68%
	\ddot{x} (m/s ²)	1	22,143	19,585	19,078	20,782	12%	14%	6,1%
		2	41,883	15,836	15,044	13,937	62%	64%	67%
AIS	x (m)	1	0,206	0,141	0,144	0,160	32%	30%	22%
		2	0,100	0,062	0,060	0,064	38%	40%	36%
	\dot{x} (m/s)	1	1,759	1,661	1,664	1,838	5,6%	5,4%	-4,5%
		2	2,071	0,793	0,750	0,852	62%	64%	59%
	\ddot{x} (m/s ²)	1	22,143	19,424	19,117	20,066	12%	14%	9,4%
		2	41,883	16,986	16,827	19,538	59%	60%	53%
AIMS	x (m)	1	0,206	0,141	0,142	0,151	31%	31%	27%
		2	0,100	0,063	0,069	0,078	37%	31%	22%
	\dot{x} (m/s)	1	1,759	1,695	1,721	1,838	3,7%	2,2%	-4,5%
		2	2,071	0,812	0,928	1,148	61%	55%	45%
	\ddot{x} (m/s ²)	1	22,143	20,030	20,285	20,511	10%	8,4%	7,4%
		2	41,883	17,580	19,139	18,739	58%	54%	55%

Fonte: Dados da pesquisa.

Diferentemente do comportamento do sistema acoplado submetidos ao sismo de El Centro e Kobe, no sismo de Northridge a Estrutura 2 exhibe atenuações maiores nas respostas

máximas absolutas. A Estrutura 1 também apresenta uma porcentagem de redução satisfatória no deslocamento máximo. Entretanto, nas respostas de velocidade e aceleração as atenuações foram pequenas. Os DBI foram levemente mais eficientes no controle em ambas as estruturas. Também, a otimização DRP foi a que evidenciou, em média, uma melhor eficácia em todos os dispositivos.

Tabela 4.15 – Respostas *rms* máximas do Caso 1 – Northridge.

Disp.	Resposta	Estr.	Resultados <i>rms</i> máximos				Diferença (%)		
			Não Acopl.	Acopl. DRP	Acopl. ENG	Acopl. ACL			
VD	x (m)	1	0,042	0,020	0,021	0,023	51%	51%	46%
		2	0,0154	0,0059	0,0057	0,005	62%	63%	66%
	\dot{x} (m/s)	1	0,376	0,210	0,210	0,219	44%	44%	42%
		2	0,314	0,099	0,097	0,094	69%	69%	70%
	\ddot{x} (m/s ²)	1	3,648	2,578	2,544	2,503	29%	30%	31%
		2	6,469	2,258	2,229	2,161	65%	66%	67%
VDI	x (m)	1	0,042	0,018	0,018	0,022	57%	56%	48%
		2	0,0154	0,0073	0,0068	0,005	53%	56%	66%
	\dot{x} (m/s)	1	0,376	0,195	0,195	0,212	48%	48%	44%
		2	0,314	0,107	0,102	0,085	66%	68%	73%
	\ddot{x} (m/s ²)	1	3,648	2,640	2,597	2,513	28%	29%	31%
		2	6,469	2,248	2,168	1,908	65%	66%	71%
AIS	x (m)	1	0,042	0,018	0,018	0,022	57%	56%	48%
		2	0,0154	0,0071	0,0068	0,007	54%	56%	58%
	\dot{x} (m/s)	1	0,376	0,189	0,188	0,203	50%	50%	46%
		2	0,314	0,105	0,101	0,104	67%	68%	67%
	\ddot{x} (m/s ²)	1	3,648	2,481	2,410	2,284	32%	34%	37%
		2	6,469	2,233	2,177	2,265	65%	66%	65%
AIMS	x (m)	1	0,042	0,018	0,018	0,020	57%	56%	52%
		2	0,0154	0,0071	0,0071	0,007	54%	54%	52%
	\dot{x} (m/s)	1	0,376	0,190	0,186	0,190	49%	51%	49%
		2	0,314	0,105	0,107	0,105	67%	66%	66%
	\ddot{x} (m/s ²)	1	3,648	2,483	2,281	2,088	32%	37%	43%
		2	6,469	2,238	2,137	1,774	65%	67%	73%

Fonte: Dados da pesquisa.

Tabela 4.16 – Deslocamento relativo máximo entre pavimentos Caso 1 – Northridge.

Disp.	Estr.	Δ_{nc}	Δ_{acopl} DRP	Δ_{acopl} ENG	Δ_{acopl} ACL	Diferença (%)		
VD	1	0,0954	0,0678	0,0692	0,0745	29%	28%	22%
	2	0,0998	0,0468	0,0466	0,0454	53%	53%	55%
VDI	1	0,0954	0,0684	0,0714	0,0763	28%	25%	20%
	2	0,0998	0,0590	0,0545	0,0420	41%	45%	58%
AIS	1	0,0954	0,0684	0,0731	0,0936	28%	23%	1,9%
	2	0,0998	0,0617	0,0602	0,0636	38%	40%	36%
AIMS	1	0,0954	0,0713	0,0799	0,0910	25%	16%	4,7%
	2	0,0998	0,0627	0,0689	0,0778	37%	31%	22%

Fonte: Dados da pesquisa.

Na atenuação das respostas *rms* máximas a técnica de acoplamento estrutural demonstrou-se bastante efetiva. As duas estruturas adjacentes exibiram uma redução satisfatória das respostas *rms*. O sistema conectado com DBI demonstrou um melhor desempenho.

Assim como nas respostas máximas absolutas, o sistema acoplado foi mais vantajoso na redução nos valores de Δ da Estrutura 2. A otimização baseada em aceleração foi desfavorável na atenuação desses valores quando o sistema é conectado com os dispositivos AIS e AIMS.

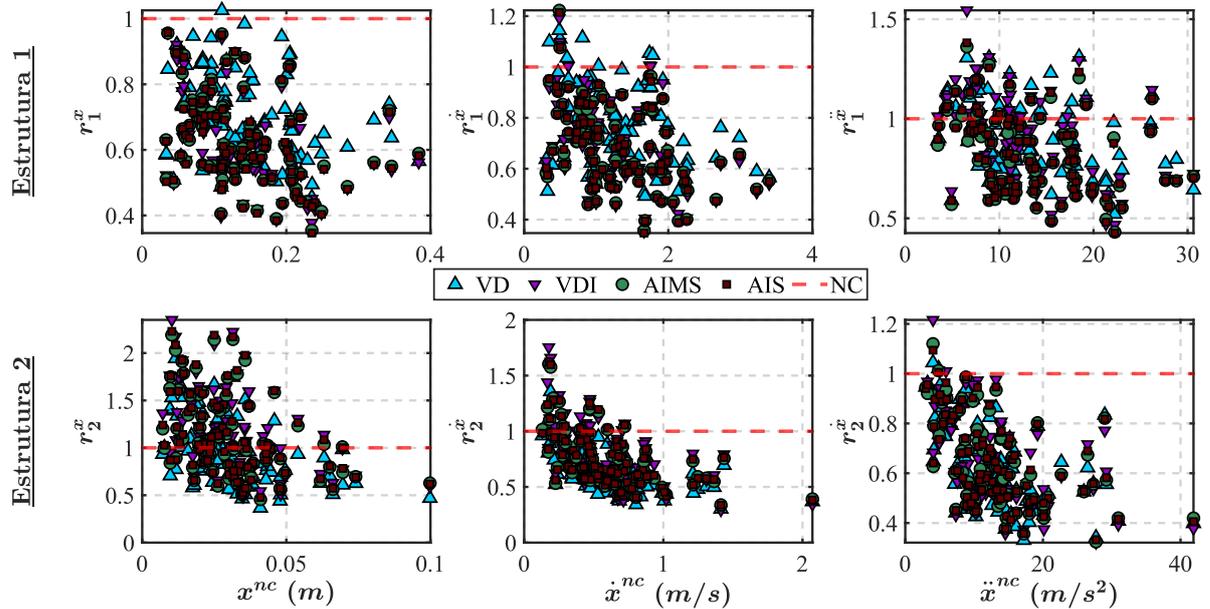
Nota 3

- O desempenho da técnica de acoplamento estrutural é substancialmente dependente das características da excitação externa.

Com objetivo de entender melhor o desempenho do sistema de controle em estudo, nas Figura 4.6, Figura 4.7 e Figura 4.8 estão ilustrados os resultados obtidos na análise das razões de resposta dinâmica máximas absolutas para os 100 registros de acelerações de sismos (Quadro A.1), aplicando os parâmetros médios determinados pelas análises DRP, ENG e ACL, respectivamente. Os valores ilustrados no eixo *x* são uma referência de grandeza das respostas para o sistema não acoplado.

Assim como o comportamento observado nos três sismos anteriores, a Estrutura 1 apresenta redução no deslocamento máximo absoluto em 97 dos registros sísmicos. Na Estrutura 2 é possível obter atenuações em um número menor solicitações, porém, o sistema acoplado foi eficiente na redução das acelerações máximas absolutas.

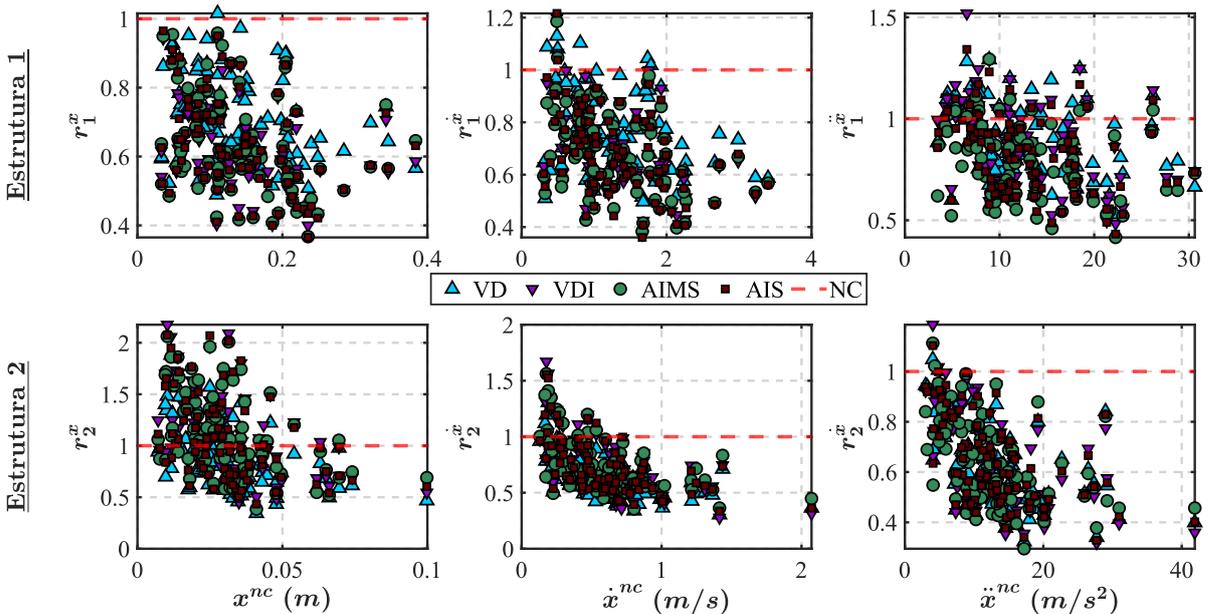
Figura 4.6 – Razões de resposta dinâmica máximas absolutas – Caso 1 – DRP.



Fonte: Dados da pesquisa.

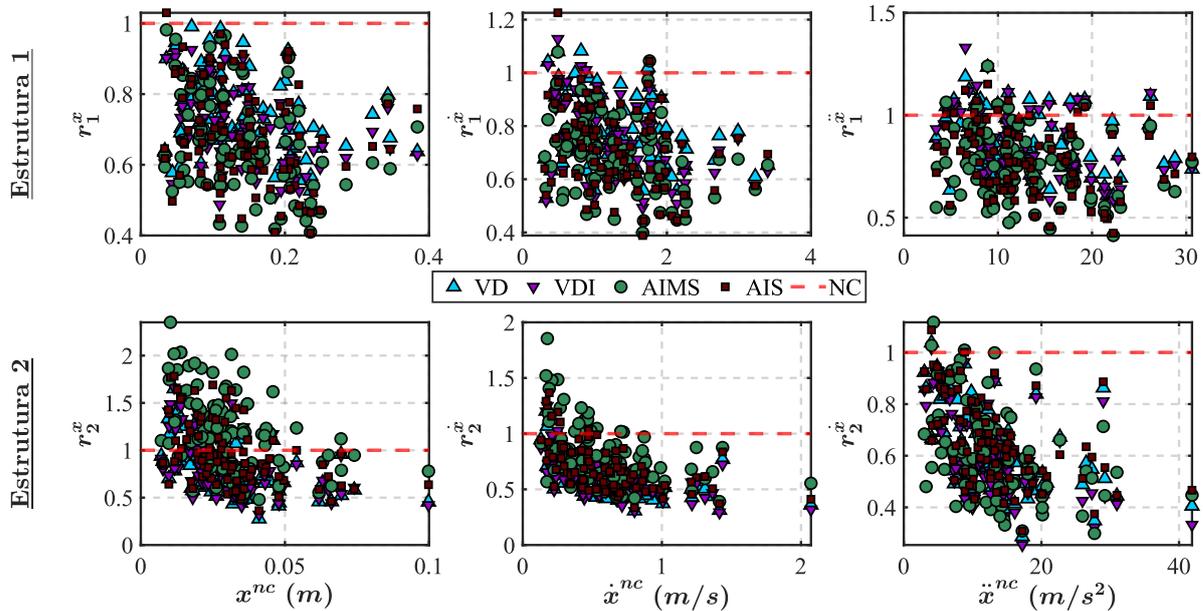
Pode-se observar ainda que os dispositivos AIMS e AIS possuem desempenhos análogos nas otimizações DRP e ENG. Já na otimização ACL, o AIMS apresenta resultados melhores na Estrutura 1. Na Estrutura 2, por sua vez, exibe eficiência inferior na redução dos deslocamentos absolutos. Também, verifica-se que o dispositivo VD expressa um desempenho inferior quando comparado aos DBI.

Figura 4.7 – Razões de resposta dinâmica máximas absolutas – Caso 1 – ENG.



Fonte: Dados da pesquisa.

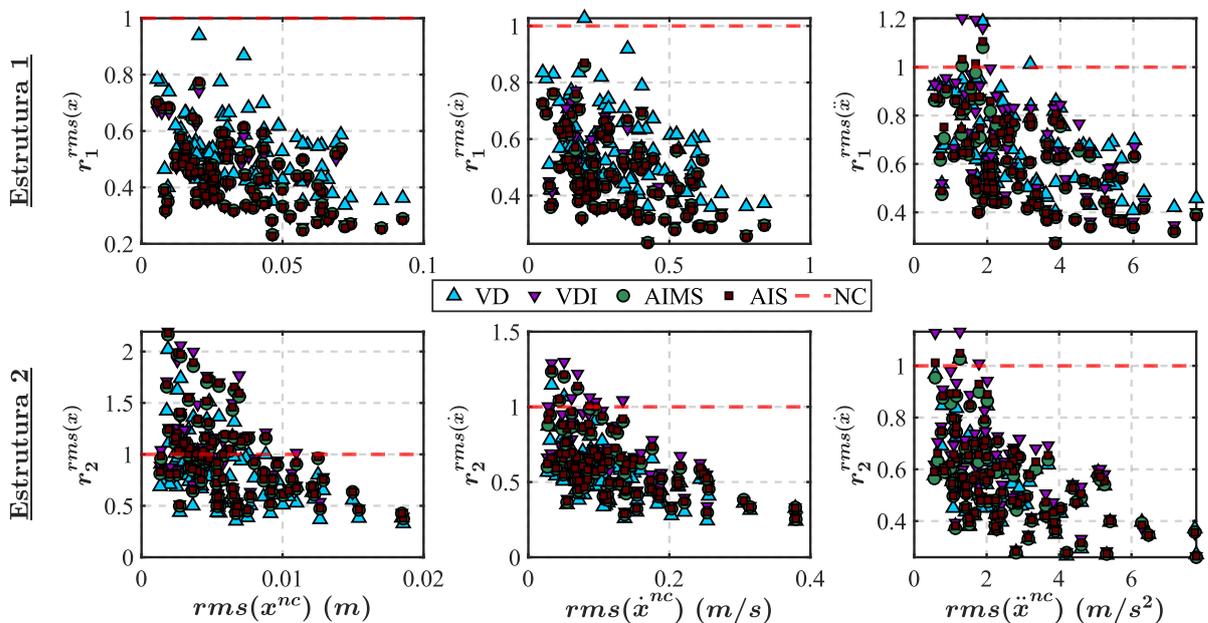
Figura 4.8 – Razões de resposta dinâmica máximas absolutas – Caso 1 – ACL.



Fonte: Dados da pesquisa.

As razões de resposta dinâmica do *rms* máximo do deslocamento, velocidade e aceleração estão apresentadas na Figura 4.9 para a análise DRP. Nas Figura 4.10 e Figura 4.11 encontram-se as razões de resposta para as análises ENG e ACL, respectivamente.

Figura 4.9 – Razões de resposta dinâmica *rms* máximas – Caso 1 – DRP.

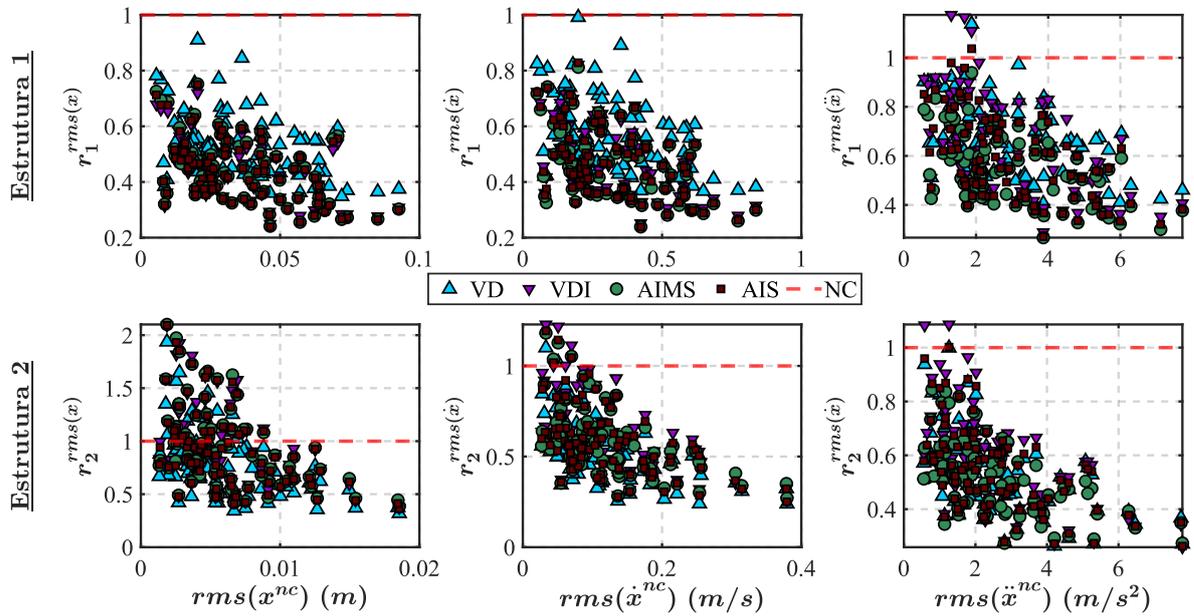


Fonte: Dados da pesquisa.

Verifica-se nas razões de resposta do *rms* máximo que o dispositivo VD apresentou menor eficiência na redução do *rms* do deslocamento na Estrutura 1 nas três análises. O desempenho dos dispositivos é bastante similar nas análises DRP e ENG. Assim como ocorreu

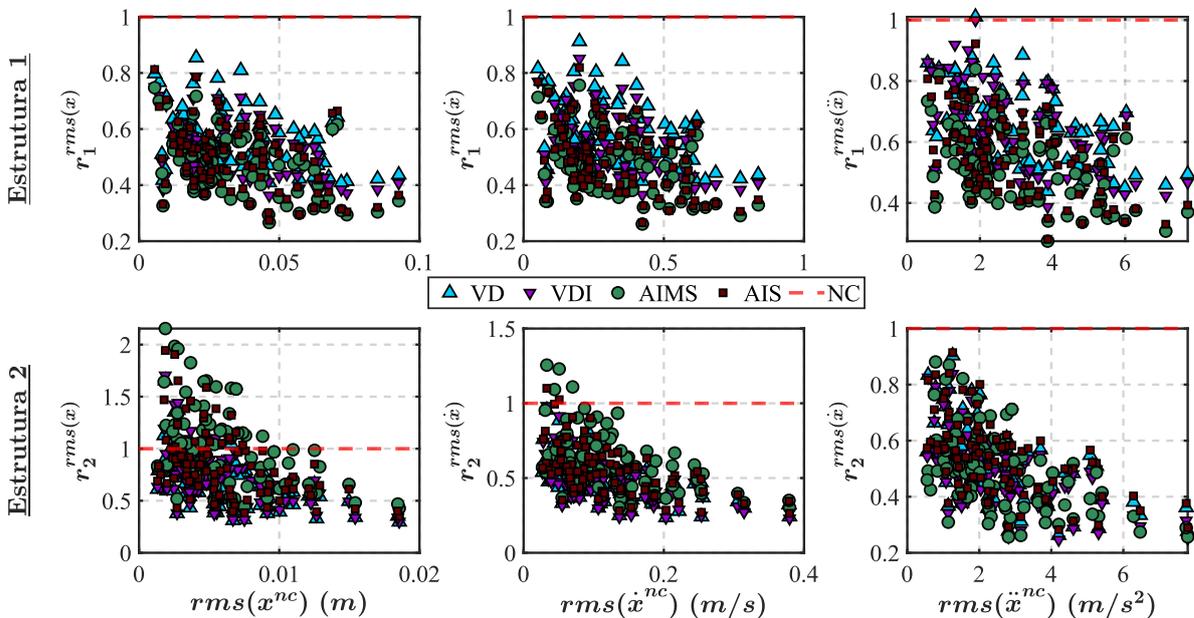
nas razões de respostas absolutas, na otimização ACL o dispositivo AIMS apresenta a pior performance na redução dos deslocamentos absolutos da Estrutura 2.

Figura 4.10 – Razões de resposta dinâmica *rms* máximas – Caso 1 – ENG.



Fonte: Dados da pesquisa.

Figura 4.11 – Razões de resposta dinâmica *rms* máximas – Caso 1 – ACL.

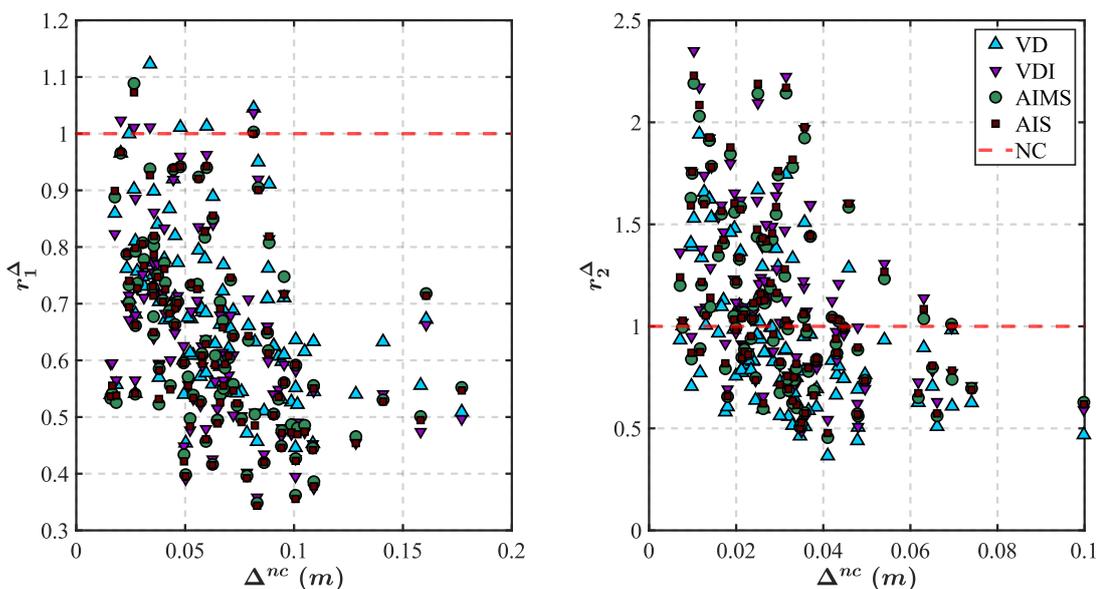


Fonte: Dados da pesquisa.

Isso ocorre em razão da função objetivo ACL ser baseada nas acelerações máximas de ambas as estruturas e a massa adicional do AIMS estar alocada sobre a Estrutura 1. Assim, há menor influência nas respostas da Estrutura 2.

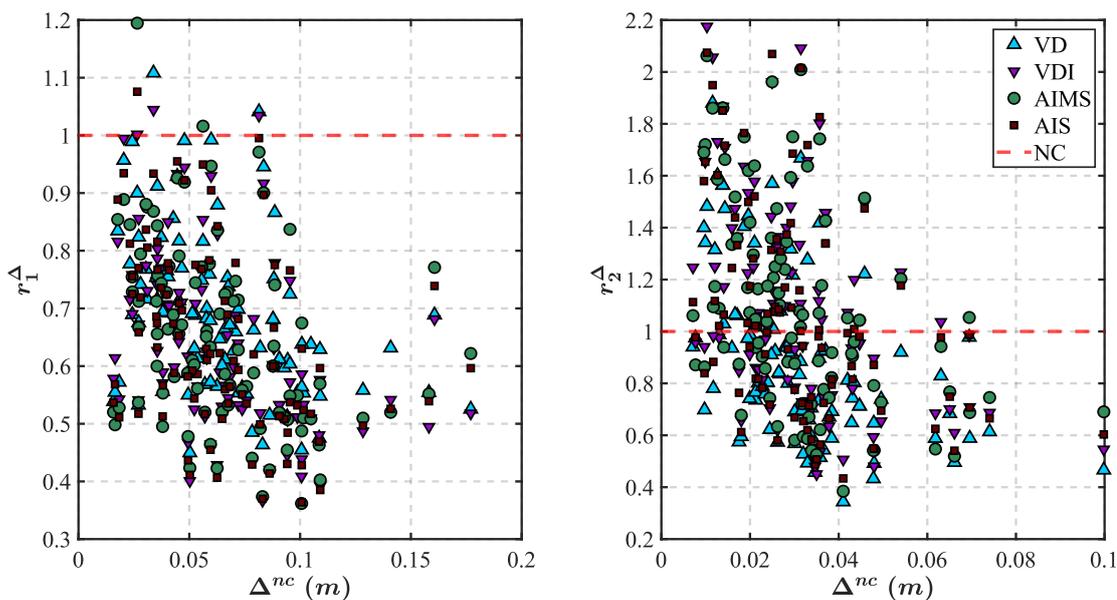
Nas Figura 4.12, Figura 4.13 e Figura 4.14 são apresentadas as razões de resposta dinâmica dos deslocamentos relativos entre pavimentos (Δ) máximos para as análises DRP, ENG e ACL, respectivamente.

Figura 4.12 – Razões de resposta dinâmica Δ máximos – Caso 1 – DRP.



Fonte: Dados da pesquisa.

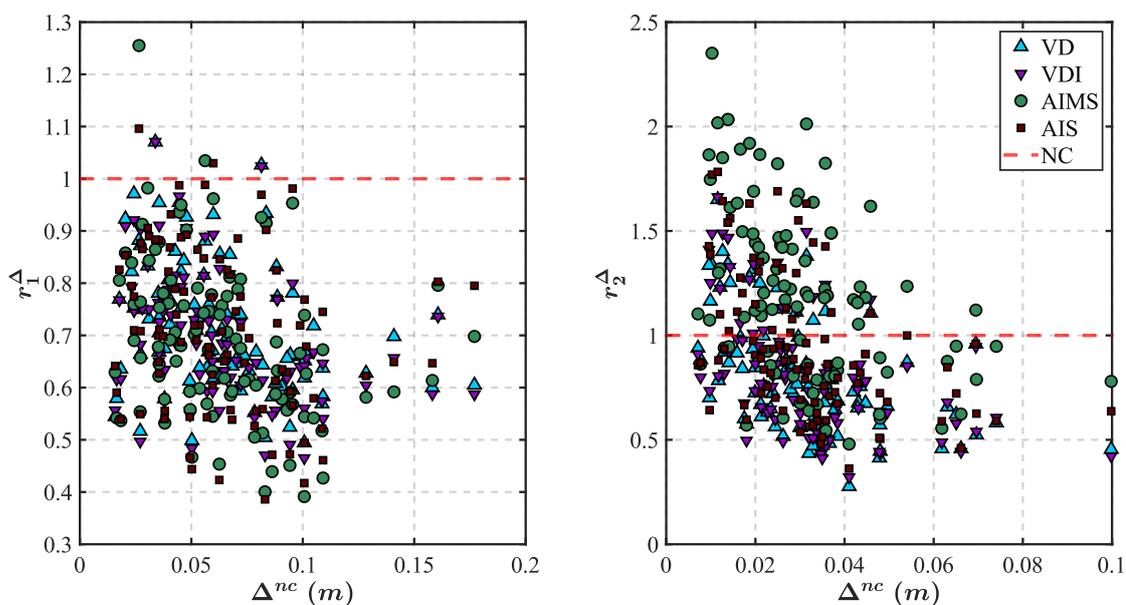
Figura 4.13 – Razões de resposta dinâmica Δ máximos – Caso 1 – ENG.



Fonte: Dados da pesquisa.

Nas razões de resposta dinâmica dos deslocamentos relativos máximo entre pavimentos, nota-se um desempenho semelhante aos resultados absolutos. Na Estrutura 1, o dispositivo AIS foi o que obteve a maior redução de Δ nas três análises. Já na Estrutura 2 o dispositivo VD foi o mais eficiente.

Figura 4.14 – Razões de resposta dinâmica Δ máximos – Caso 1 – ACL.



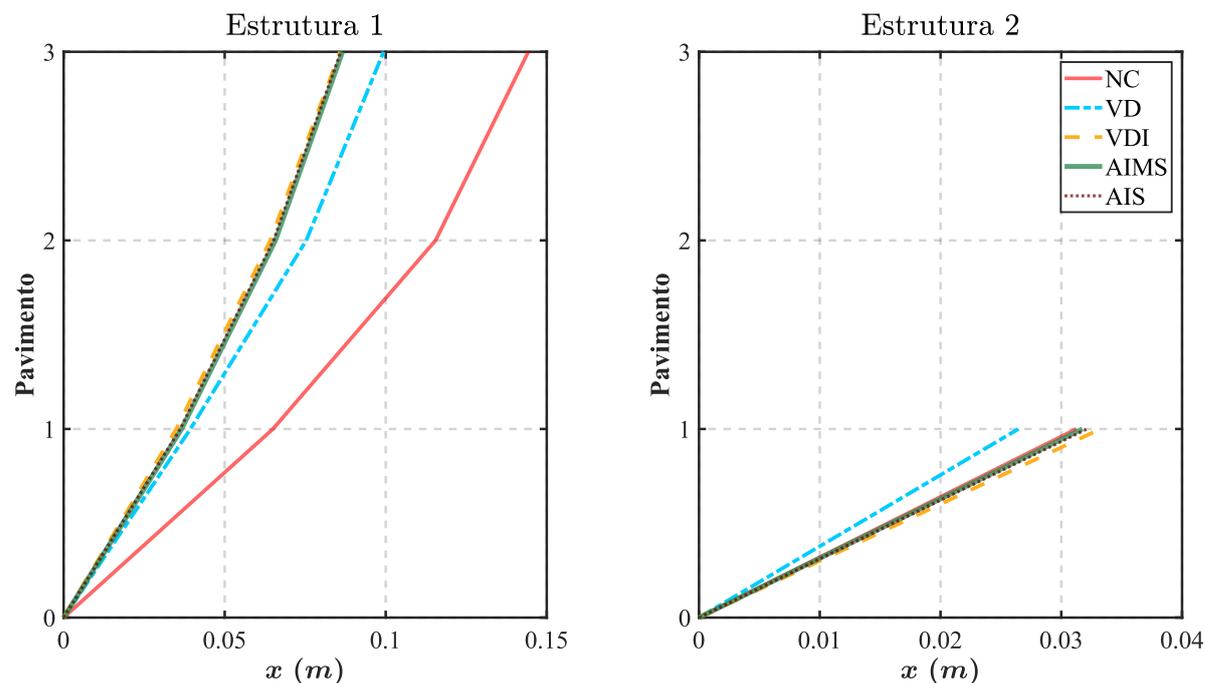
Fonte: Dados da pesquisa.

Nota 4

- Mesmo com uma diferença entre as frequências das estruturas ser de, aproximadamente, 50 %, a técnica de acoplamento estrutural, nesse Caso 1, não traz segurança para a Estrutura 2.

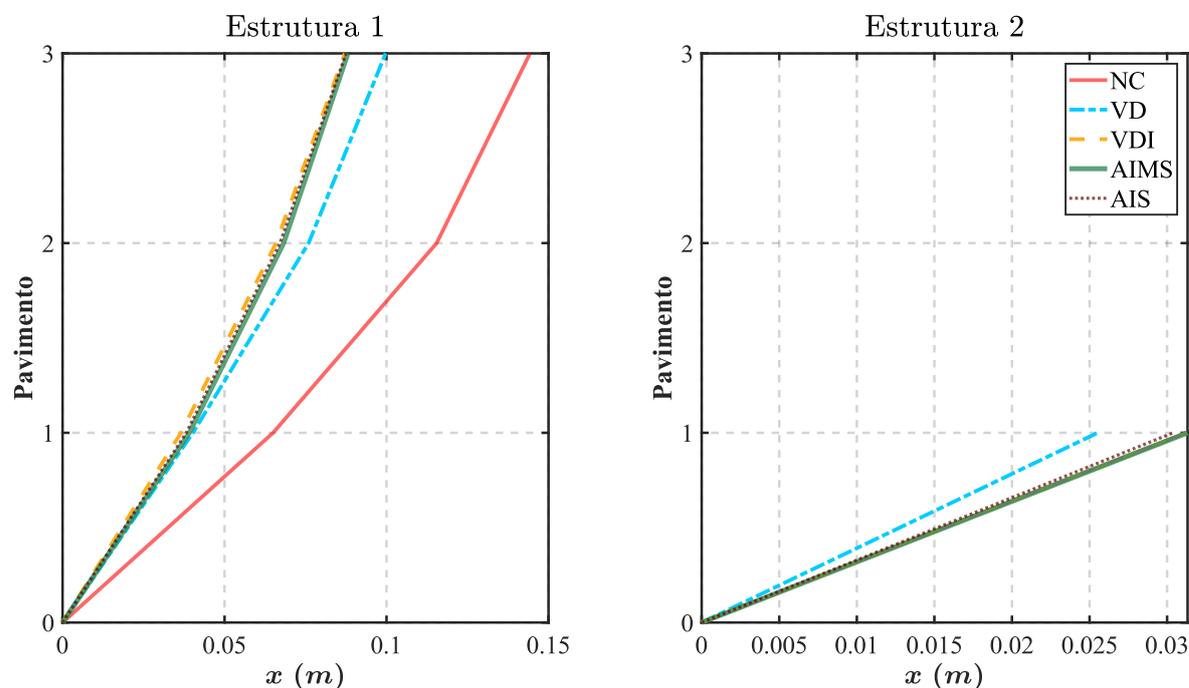
Para elucidar o desempenho de cada dispositivo, nas Figura 4.15, Figura 4.16 e Figura 4.17 é retratada a média dos deslocamentos máximos absolutos de cada pavimento para os 100 registros sísmicos.

Figura 4.15 – Média dos deslocamentos absolutos máximos por pavimento – Caso 1 – DRP.



Fonte: Dados da pesquisa.

Figura 4.16 – Média dos deslocamentos absolutos máximos por pavimento – Caso 1 – ENG.

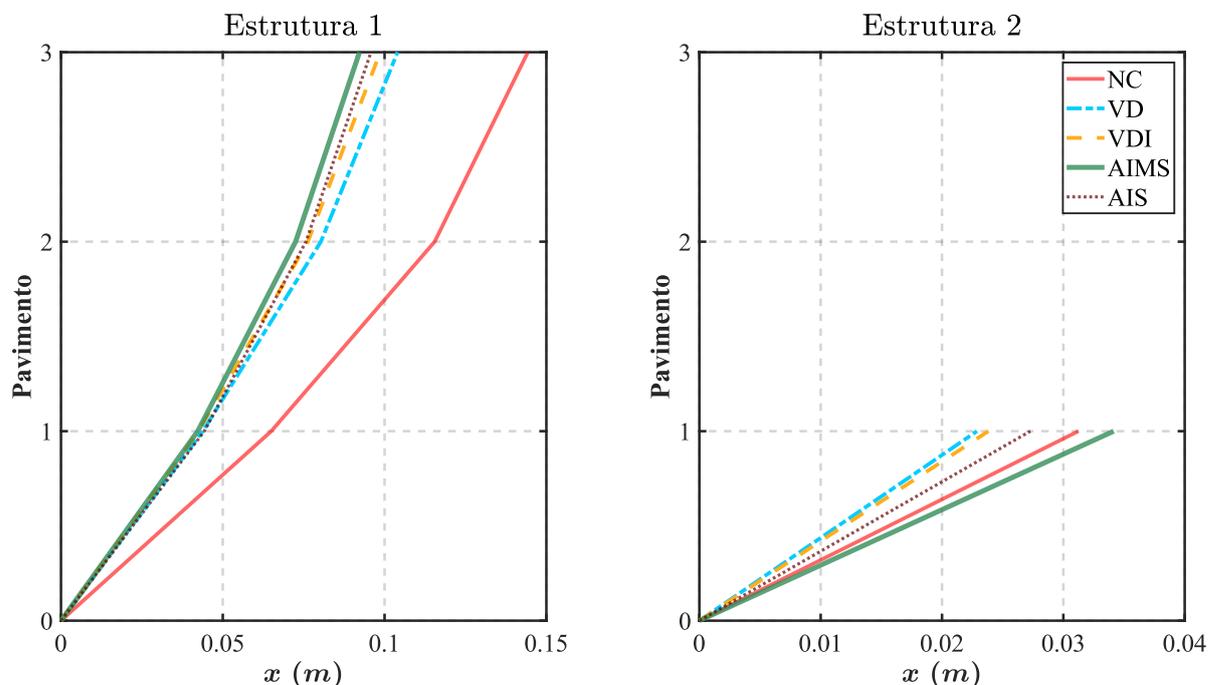


Fonte: Dados da pesquisa.

Nas análises DRP e ENG, o dispositivo VDI foi o que apresentou melhor performance no controle dos deslocamentos da Estrutura 1. Na Estrutura 2, por sua vez, o dispositivo VD exibiu desempenho superior na redução dos deslocamentos em cada pavimento. Na análise

ACL, pode-se perceber que os dispositivos VDI e AIS também são eficientes no controle dos deslocamentos da Estrutura 2. Na Estrutura 1 o dispositivo AIMS obteve melhor desempenho, entretanto, não é eficaz na atenuação dos deslocamentos da Estrutura 2.

Figura 4.17 – Média dos deslocamentos absolutos máximos por pavimento – Caso 1 – ACL.



Fonte: Dados da pesquisa.

Os resultados do Caso 1 demonstraram que a técnica de acoplamento estrutural consegue proporcionar um desempenho satisfatório no controle das respostas dinâmicas em estruturas adjacentes. Porém, o conteúdo de frequências da excitação em relação à estrutura apresentou-se como um fator significativo para o desempenho do sistema de controle. Ademais, os dispositivos baseados em *inerters* exibiram uma performance superior ao dispositivo viscofluido, principalmente na Estrutura 1. A análise ACL, que aplica uma função objetivo baseada em aceleração, concebeu os amortecedores com os menores coeficientes mecânicos. Nessa análise, o sistema de controle foi menos eficiente na Estrutura 1 e mais eficiente na Estrutura 2, quando comparado aos resultados obtidos nas análises DRP e ENG.

A frequência fundamental da Estrutura 2 é outro ponto significativo para a eficiência desse sistema de controle. De fato, o conteúdo de frequências do sismo de Northridge, por exemplo, é mais denso em torno do valor da frequência da Estrutura 2. Assim, o acoplamento estrutural foi bastante eficaz nessa estrutura, pois é capaz de gerar maiores respostas relativas.

Nota 5

- O acoplamento estrutural demonstrou-se eficiente para estruturas rígidas quando a solicitação externa apresenta mais energia em frequências próximas à da estrutura.

4.2 CASO 2 – ESTRUTURA DE 8 PAVIMENTOS – ESTRUTURA DE 4 PAVIMENTO

No Caso 2, utiliza-se o modelo *shear frame* de um edifício de 8 pavimentos adjacente a um edifício de 4 pavimentos. Na Tabela 4.17 apresentam-se as frequências fundamentais de ambas as estruturas.

Tabela 4.17 – Frequências fundamentais das estruturas adjacentes – Caso 2.

Estrutura	Frequência (Hz)
1 (8 Pavimentos)	0,601
2 (4 Pavimentos)	1,132

Fonte: Dados da pesquisa.

Nesse arranjo de estruturas adjacentes são possíveis diversas localizações, disposições e quantidades dos dispositivos de conexão. O processo de otimização buscou, também, a melhor quantidade e disposição dos amortecedores. Assim, serão apresentados os resultados das médias, desvios-padrão e coeficientes de variação (CV) das análises de otimização em relação a posição e quantidade dos amortecedores com maior frequência de aparição. Os resultados das análises de otimização do Caso 2 são apresentados na Tabela 4.18 para a análise DRP, Tabela 4.19 para a ENG e Tabela 4.20 para a análise ACL. Para o sistema não acoplado $d_1 = 0,0217$ m e $d_2 = 0,0168$ m.

Tabela 4.18 – Resultados da análise de otimização DRP – Caso 2.

Dispositivo	Parâmetro	Resultados								
		Posiç.	c (Ns/m)	k (N/m)	b (kg)	m^t (kg)	f_{obj} (m ²)	t_{med} (s)	d_1 (m)	d_2 (m)
VD _{DRP}	Média		3,03E+05	0			0,000573	5,24	0,0088	0,0073
	Desvio Padrão	1 e 4	6,58E+01	0			4,87E-11	7,99E-01	1,38E-04	9,37E-05
	CV (%)		0,02%	0			0,00%	15,2%	1,56%	1,28%
VDI _{DRP}	Média		2,91E+05	0	3,11E+04		0,000529	9,16	0,0086	0,0080
	Desvio Padrão	4	1,39E+02	0	1,49E+01		2,46E-10	1,29E+00	3,99E-04	4,04E-05
	CV (%)		0,05%	0	0,05%		0,00%	14,1%	4,64%	0,51%
AIS _{DRP}	Média		3,45E+05	4,02E+05	1,05E+05		0,000512	10,80	0,0082	0,0077
	Desvio Padrão	4	1,37E+04	2,20E+05	1,30E+04		1,67E-05	1,55E+00	2,17E-04	1,83E-04
	CV (%)		3,96%	54,8%	12,4%		3,27%	14,4%	2,64%	2,37%
AIMS _{DRP}	Média		3,20E+05	6,03E+05	9,28E+04	2,40E+03	0,000515	9,73	0,0082	0,0078
	Desvio Padrão	4	2,08E+04	2,36E+05	7,15E+02	4,07E+00	1,53E-05	1,38E+00	2,02E-04	1,58E-04
	CV (%)		6,49%	39,1%	0,77%	0,17%	2,98%	14,2%	2,46%	2,01%

Fonte: Dados da pesquisa.

Tabela 4.19 – Resultados da análise de otimização ENG – Caso 2.

Dispositivo	Parâmetro	Resultados								
		Posiç	c (Ns/m)	k (N/m)	b (kg)	m^t (kg)	f_{obj} (m ²)	t_{med} (s)	d_1 (m)	d_2 (m)
VD _{ENG}	Média		2,79E+05	0			4,60E+03	12,86	0,0089	0,0072
	Desvio Padrão	1 e 4	1,92E-02	0			3,67E-11	1,05E+00	4,70E-09	4,01E-09
	CV (%)		0,00%	0			0,00%	8,13%	0,00%	0,00%
VDI _{ENG}	Média		2,80E+05	0	2,34E+04		4,36E+03	8,50	0,0087	0,0077
	Desvio Padrão	4	1,38E-02	0	3,58E-03		1,28E-11	6,48E-01	7,13E-11	1,47E-10
	CV (%)		0,00%	0	0,00%		0,00%	7,63%	0,00%	0,0%
AIS _{ENG}	Média		2,92E+05	7,00E+05	7,63E+04		3,94E+03	10,63	0,0082	0,0079
	Desvio Padrão	4	6,93E+03	1,93E+04	1,12E+03		1,46E+00	2,72E+00	1,99E-05	2,56E-05
	CV (%)		2,37%	2,76%	1,47%		0,04%	25,6%	0,24%	0,33%
AIMS _{ENG}	Média		2,87E+05	7,30E+05	7,41E+04	3,27E+03	3,94E+03	11,47	0,0082	0,0080
	Desvio Padrão	4	4,88E-01	3,71E+02	1,14E+01	4,97E+01	6,33E-03	1,91E+00	7,45E-07	2,23E-06
	CV (%)		0,00%	0,05%	0,02%	1,52%	0,00%	16,7%	0,01%	0,03%

Fonte: Dados da pesquisa.

Tabela 4.20 – Resultados da análise de otimização ACL – Caso 2.

Dispositivo	Parâmetro	Resultados								
		Posiç.	c (Ns/m)	k (N/m)	b (kg)	m^t (kg)	f_{obj} (m ²)	t_{med} (s)	d_1 (m)	d_2 (m)
VD _{ACL}	Média		2,71E+05	0			2,381	9,88	0,0093	0,0069
	Desvio Padrão	4	7,66E+00	0			2,05E-07	8,55E-01	1,04E-05	5,07E-06
	CV (%)		0,00%	0			0,00%	8,66%	0,11%	0,07%
VDI _{ACL}	Média		2,71E+05	0	1,51E+03		2,381	14,30	0,0093	0,0069
	Desvio Padrão	4	4,27E-02	0	5,38E-03		1,63E-14	7,78E-01	1,23E-07	5,99E-08
	CV (%)		0,00%	0	0,00%		0,00%	5,44%	0,00%	0,00%
AIS _{ACL}	Média		2,20E+05	6,83E+05	6,36E+04		2,344	8,93	0,0086	0,0076
	Desvio Padrão	4	1,77E+04	2,40E+05	9,17E+03		8,09E-03	9,15E-01	1,62E-04	3,09E-04
	CV (%)		8,08%	35,1%	14,4%		0,35%	10,3%	1,88%	4,04%
AIMS _{ACL}	Média		7,57E+05	1,00E+03	3,69E+05	9,20E+03	2,290	10,03	0,0083	0,0079
	Desvio Padrão	2	9,22E+04	4,05E+00	2,05E+05	5,90E-01	1,67E-02	1,54E+00	2,89E-04	2,25E-04
	CV (%)		12,2%	0,40%	55,5%	0,00%	0,73%	15,4%	3,49%	2,85%

Fonte: Dados da pesquisa.

Nas análises de otimização do Caso 2 observa-se, inicialmente, um maior tempo de processamento em razão das várias possibilidades de configuração para o sistema acoplado. Os valores de CV das características dos dispositivos são apropriados em razão da complexidade da otimização. Como no caso anterior, os resultados da análise ENG apresentam CV menores. Nota-se uma tendência da análise ACL em reduzir os valores das propriedades mecânicas dos elementos de conexão, em comparação às análises DRP e ENG. Entretanto, esse comportamento é mais sutil que o observado no Caso 1.

Para o dispositivo VD, as análises DRP e ENG determinaram o uso de dois dispositivos no sistema acoplado. Já para o sistema acoplado com DBI é necessário apenas um dispositivo para o controle das respostas dinâmicas. A exceção se dá no dispositivo VD_{ACL} o qual determina o uso de apenas um amortecedor conectando as estruturas.

As propriedades mecânicas dos dispositivos VD e VDI evidenciam pouca variação comparando as três análises. Também, o coeficiente de amortecimento determinado para os dois dispositivos é bastante semelhante. Na análise ACL, os valores de d_1 e d_2 para o sistema acoplado com esses dispositivos, é igual. Já nas análises DRP e ENG, há uma pequena redução de d_1 e um leve aumento de d_2 quando se aplica o elemento *inertor*. Na Tabela 4.21 são apresentadas as porcentagens de redução do desvio padrão do deslocamento relativo máximo entre pavimentos (d_1 e d_2) para o Caso 2.

Tabela 4.21 – Diferença dos valores de d_1 e d_2 para o Caso 2.

Dispositivo	Análise	Diferença d_1 (%)	Diferença d_2 (%)
VD	DRP	59,3%	56,4%
	ENG	58,9%	57,0%
	ACL	57,0%	58,8%
VDI	DRP	60,4%	52,5%
	ENG	60,0%	54,4%
	ACL	57,2%	58,7%
AIMS	DRP	62,0%	54,0%
	ENG	62,0%	53,3%
	ACL	60,5%	54,6%
AIMS	DRP	62,2%	53,3%
	ENG	62,2%	52,5%
	ACL	61,9%	53,1%

Fonte: Dados da pesquisa.

Para o sistema não acoplado, a Estrutura 1 apresenta o valor de $d_1 = 0,0217$ m e na Estrutura 2 é de $d_2 = 0,0168$ m. Verifica-se que os DBI apresentar maior vantagem para o controle da resposta da Estrutura 1.

Nota 6

- A estrutura com maior flexibilidade beneficia-se mais com o acoplamento estrutural.
- O uso de DBI resultam em sistemas acoplados com menor número de amortecedores.
- A análise de otimização baseada em energia tem a tendência de ser mais homogênea.

Nas Tabela 4.22 e Tabela 4.23 são apresentadas as respostas dinâmicas máximas absolutas e *rms* máximas, respectivamente, para as estruturas submetidas as acelerações do sismo de El Centro.

Pode-se verificar nas respostas máximas absolutas que os DBI aprimoram a performance na redução dos deslocamentos absolutos da Estrutura 1. Na Estrutura 2, o desempenho na atenuação dos deslocamentos é maior e o uso de DBI não altera essa eficiência. Nas acelerações máximas absolutas, o dispositivo VDI apresentou desempenho inferior em comparação aos outros amortecedores.

Tabela 4.22 – Respostas dinâmicas máximas absolutas do Caso 2 – El Centro.

Disp.	Resposta	Estr.	Resultados máximos absolutos				Diferença (%)		
			Não Acopl.	Acopl. DRP	Acopl. ENG	Acopl. ACL			
VD	x (m)	1	0,208	0,134	0,134	0,132	35%	35%	36%
		2	0,202	0,079	0,079	0,078	61%	61%	61%
	\dot{x} (m/s)	1	0,856	0,722	0,718	0,709	16%	16%	17%
		2	1,371	0,636	0,642	0,645	54%	53%	53%
	\ddot{x} (m/s ²)	1	6,316	5,264	5,216	5,239	17%	17%	17%
		2	11,73	4,790	4,793	4,979	59%	59%	58%
VDI	x (m)	1	0,208	0,121	0,122	0,131	42%	41%	37%
		2	0,202	0,080	0,079	0,078	60%	61%	61%
	\dot{x} (m/s)	1	0,856	0,776	0,760	0,711	9,4%	11%	17%
		2	1,371	0,604	0,615	0,644	56%	55%	53%
	\ddot{x} (m/s ²)	1	6,316	5,970	5,765	5,274	5,5%	8,7%	16%
		2	11,73	4,215	4,351	4,930	64%	63%	58%

AIS	x (m)	1	0,208	0,126	0,127	0,127	39%	39%	39%
		2	0,202	0,083	0,083	0,082	59%	59%	60%
	\dot{x} (m/s)	1	0,856	0,716	0,711	0,692	16%	17%	19%
		2	1,371	0,652	0,665	0,678	52%	51%	51%
	\ddot{x} (m/s ²)	1	6,316	5,381	5,315	5,114	15%	16%	19%
		2	11,73	4,710	4,700	4,772	60%	60%	59%
AIMS	x (m)	1	0,208	0,127	0,127	0,151	39%	39%	27%
		2	0,202	0,083	0,084	0,081	59%	59%	60%
	\dot{x} (m/s)	1	0,856	0,704	0,699	0,775	18%	18%	10%
		2	1,371	0,658	0,670	0,775	52%	51%	43%
	\ddot{x} (m/s ²)	1	6,316	5,238	5,175	4,503	17%	18%	29%
		2	11,73	4,748	4,722	6,237	60%	60%	47%

Fonte: Dados da pesquisa.

Tabela 4.23 – Respostas *rms* máximas do Caso 2 – El Centro.

Disp.	Resposta	Estr.	Resultados <i>rms</i> máximos				Diferença (%)		
			Não Acopl.	Acopl. DRP	Acopl. ENG	Acopl. ACL			
VD	x (m)	1	0,086	0,037	0,037	0,037	57%	57%	57%
		2	0,057	0,018	0,017	0,017	69%	69%	69%
	\dot{x} (m/s)	1	0,344	0,180	0,179	0,179	48%	48%	48%
		2	0,411	0,118	0,119	0,120	71%	71%	71%
	\ddot{x} (m/s ²)	1	1,788	1,159	1,147	1,145	35%	36%	36%
		2	3,002	0,922	0,927	0,924	69%	69%	69%
VDI	x (m)	1	0,086	0,034	0,035	0,037	60%	59%	57%
		2	0,057	0,020	0,019	0,018	65%	66%	69%
	\dot{x} (m/s)	1	0,344	0,184	0,181	0,179	47%	47%	48%
		2	0,411	0,127	0,124	0,120	69%	70%	71%
	\ddot{x} (m/s ²)	1	1,788	1,372	1,317	1,153	23%	26%	36%
		2	3,002	0,909	0,904	0,919	70%	70%	69%
AIS	x (m)	1	0,086	0,034	0,034	0,034	61%	61%	60%
		2	0,057	0,0196	0,0198	0,019	66%	65%	66%
	\dot{x} (m/s)	1	0,344	0,171	0,168	0,167	50%	51%	52%
		2	0,411	0,125	0,127	0,127	70%	69%	69%
	\ddot{x} (m/s ²)	1	1,788	1,166	1,146	1,114	35%	36%	38%
		2	3,002	0,911	0,923	0,945	70%	69%	69%

AIMS	x (m)	1	0,086	0,034	0,034	0,039	61%	61%	54%
		2	0,057	0,020	0,021	0,018	65%	64%	68%
	\dot{x} (m/s)	1	0,344	0,169	0,166	0,176	51%	52%	49%
		2	0,411	0,126	0,129	0,143	69%	69%	65%
	\ddot{x} (m/s ²)	1	1,788	1,138	1,119	1,002	36%	37%	44%
		2	3,002	0,911	0,924	1,277	70%	69%	57%

Fonte: Dados da pesquisa.

Já nas respostas *rms* máximas há uma redução considerável nas respostas de ambas as estruturas adjacentes. As 3 análises de otimização apresentaram resultados semelhantes. O elemento *inertor* ampliou a redução das respostas *rms* do deslocamento na Estrutura 1, assim como verificado nos resultados estocásticos. Os valores Δ para o sismo de El Centro estão apresentados na Tabela 4.24.

Tabela 4.24 – Deslocamento relativo máximo entre pavimentos do Caso 2 – El Centro.

Disp.	Estr.	Δ_{nc}	Δ_{acopl} DRP	Δ_{acopl} ENG	Δ_{acopl} ACL	Diferença (%)		
VD	1	0,0420	0,0283	0,0280	0,0280	33%	33%	33%
	2	0,0689	0,0246	0,0246	0,0245	64%	64%	64%
VDI	1	0,0420	0,0293	0,0289	0,0280	30%	31%	33%
	2	0,0689	0,0250	0,0247	0,0245	64%	64%	65%
AIS	1	0,0420	0,0277	0,0272	0,0267	34%	35%	36%
	2	0,0689	0,0256	0,0256	0,0253	63%	63%	63%
AIMS	1	0,0420	0,0273	0,0269	0,0287	35%	36%	32%
	2	0,0689	0,0257	0,0258	0,0254	63%	63%	63%

Fonte: Dados da pesquisa.

Os dispositivos AIS e AIMS apresentaram uma pequena vantagem na redução dos valores de Δ em relação aos outros amortecedores.

Nota 7

- Em razão da maior flexibilidade das estruturas adjacentes do caso 2, o sistema acoplado e otimizado resultou mais eficiente no controle das respostas da estrutura mais rígida.

Para as estruturas submetidas as acelerações do sismo de Kobe, são apresentadas as respostas dinâmicas máximas absolutas na Tabela 4.25. As respostas *rms* máximas são exibidas na Tabela 4.26 e o deslocamento relativo máximo entre pavimentos na Tabela 4.27.

Tabela 4.25 – Respostas dinâmicas máximas absolutas do Caso 2 – Kobe.

Disp.	Resposta	Estr.	Resultados máximos absolutos				Diferença (%)		
			Não Acopl.	Acopl. DRP	Acopl. ENG	Acopl. ACL			
VD	x (m)	1	0,652	0,500	0,504	0,510	23%	23%	22%
		2	0,517	0,260	0,257	0,262	50%	50%	49%
	\dot{x} (m/s)	1	3,373	2,651	2,636	2,603	21%	22%	23%
		2	4,074	1,817	1,862	1,965	55%	54%	52%
	\ddot{x} (m/s ²)	1	18,51	16,65	16,58	16,83	10%	10%	9,1%
		2	28,59	12,55	13,046	13,85	56%	54%	52%
VDI	x (m)	1	0,652	0,445	0,463	0,507	32%	29%	22%
		2	0,517	0,285	0,286	0,265	45%	45%	49%
	\dot{x} (m/s)	1	3,373	2,482	2,482	2,587	26%	26%	23%
		2	4,074	2,103	2,109	1,981	48,4%	48%	51%
	\ddot{x} (m/s ²)	1	18,51	17,26	17,25	16,89	6,7%	6,8%	8,7%
		2	28,59	13,16	13,70	13,96	54%	52%	51%
AIS	x (m)	1	0,652	0,424	0,420	0,441	35%	36%	32%
		2	0,517	0,289	0,295	0,294	44%	43%	43%
	\dot{x} (m/s)	1	3,373	2,272	2,212	2,219	33%	34%	34%
		2	4,074	2,054	2,112	2,152	50%	48%	47%
	\ddot{x} (m/s ²)	1	18,51	15,83	15,49	15,43	14%	16%	17%
		2	28,59	13,26	13,84	14,83	54%	52%	48%
AIMS	x (m)	1	0,652	0,421	0,409	0,504	36%	37%	23%
		2	0,517	0,297	0,302	0,269	43%	41%	48%
	\dot{x} (m/s)	1	3,373	2,242	2,228	2,617	34%	34%	22%
		2	4,074	2,106	2,185	1,974	48%	46%	52%
	\ddot{x} (m/s ²)	1	18,51	15,46	14,99	16,50	16%	19%	11%
		2	28,59	13,73	14,32	18,33	52%	50%	36%

Fonte: Dados da pesquisa.

Do mesmo modo que os resultados para o sismo de El Centro, no sismo de Kobe a Estrutura 2 apresenta uma redução mais significativa das respostas máximas absolutas. Os DBI melhoram a performance do sistema de controle por acoplamento estrutural na Estrutura 1, reduzindo de forma branda o desempenho na Estrutura 2.

Tabela 4.26 – Respostas *rms* máximas do Caso 2 – Kobe.

Disp.	Resposta	Estr.	Resultados <i>rms</i> máximos				Diferença (%)		
			Não Acopl.	Acopl. DRP	Acopl. ENG	Acopl. ACL			
VD	x (m)	1	0,095	0,051	0,050	0,050	47%	47%	48%
		2	0,0642	0,0240	0,0236	0,023	63%	63%	64%
	\dot{x} (m/s)	1	0,384	0,250	0,247	0,243	35%	36%	37%
		2	0,465	0,148	0,149	0,150	68%	68%	68%
	\ddot{x} (m/s ²)	1	1,869	1,432	1,410	1,384	23%	25%	26%
		2	3,323	1,076	1,085	1,076	68%	67%	68%
VDI	x (m)	1	0,095	0,044	0,045	0,049	54%	53%	48%
		2	0,0642	0,0276	0,0263	0,024	57%	59%	63%
	\dot{x} (m/s)	1	0,384	0,228	0,229	0,242	41%	40%	37%
		2	0,465	0,161	0,158	0,151	65%	66%	68%
	\ddot{x} (m/s ²)	1	1,869	1,418	1,383	1,378	24%	26%	26%
		2	3,323	1,082	1,078	1,073	67%	68%	68%
AIS	x (m)	1	0,095	0,043	0,041	0,042	55%	57%	56%
		2	0,0642	0,0273	0,0276	0,027	58%	57%	59%
	\dot{x} (m/s)	1	0,384	0,223	0,217	0,216	42%	43%	44%
		2	0,465	0,160	0,163	0,163	66%	65%	65%
	\ddot{x} (m/s ²)	1	1,869	1,359	1,331	1,306	27%	29%	30%
		2	3,323	1,071	1,090	1,119	68%	67%	66%
AIMS	x (m)	1	0,095	0,042	0,041	0,052	56%	57%	46%
		2	0,0642	0,0277	0,0284	0,025	57%	56%	62%
	\dot{x} (m/s)	1	0,384	0,222	0,215	0,246	42%	44%	36%
		2	0,465	0,163	0,168	0,188	65%	64%	60%
	\ddot{x} (m/s ²)	1	1,869	1,349	1,322	1,297	28%	29%	31%
		2	3,323	1,092	1,117	1,629	67%	66%	51%

Fonte: Dados da pesquisa.

Novamente, o comportamento observado nas respostas *rms* máximas e no deslocamento relativo entre pavimentos é análogo às respostas máximas absolutas. Os DBI fornecem uma melhora na performance da técnica de controle por acoplamento estrutural principalmente na Estrutura 1.

Tabela 4.27 – Deslocamento relativo máximo entre pavimentos do Caso 2 – Kobe.

Disp.	Estr.	Δ_{nc}	Δ_{acopl} DRP	Δ_{acopl} ENG	Δ_{acopl} ACL	Diferença (%)		
VD	1	0,1407	0,0828	0,0822	0,0838	41%	42%	40%
	2	0,1814	0,0707	0,0731	0,0793	61%	60%	56%
VDI	1	0,1407	0,0845	0,0850	0,0840	40%	40%	40%
	2	0,1814	0,0789	0,0796	0,0797	57%	56%	56%
AIS	1	0,1407	0,0779	0,0773	0,0749	45%	45%	47%
	2	0,1814	0,0789	0,0824	0,0877	57%	55%	52%
AIMS	1	0,1407	0,0780	0,0780	0,1042	45%	45%	26%
	2	0,1814	0,0813	0,0857	0,0903	55%	53%	50%

Fonte: Dados da pesquisa.

Nas Tabela 4.28, Tabela 4.29 e Tabela 4.30 são apresentadas as respostas máximas absolutas, respostas *rms* máximas e deslocamento relativo máximo entre pavimentos, respectivamente, para as estruturas submetidas às acelerações do sismo de Northridge.

É possível notar que a Estrutura 2 exibe reduções de até 72 % nos valores de deslocamentos máximos absolutos quando submetida ao sismo de Northridge.

Nota 8

- A estrutura com os maiores deslocamentos apresenta maiores reduções das respostas dinâmicas na técnica de acoplamento estrutural.

Tabela 4.28 – Respostas dinâmicas máximas absolutas do Caso 2 – Northridge.

Disp.	Resposta	Estr.	Resultados máximos absolutos				Diferença (%)		
			Não Acompl.	Acompl. DRP	Acompl. ENG	Acompl. ACL			
VD	x (m)	1	0,329	0,179	0,181	0,192	45%	45%	42%
		2	0,404	0,113	0,115	0,120	72%	72%	70%
	\dot{x} (m/s)	1	1,404	1,229	1,225	1,224	12%	12%	13%
		2	3,478	1,328	1,352	1,409	62%	61%	59%
	\ddot{x} (m/s ²)	1	12,60	12,68	12,57	12,04	-0,6%	0,2%	4,4%
		2	31,49	11,47	11,70	13,18	64%	63%	58%
VDI	x (m)	1	0,329	0,197	0,198	0,193	40%	40%	41%
		2	0,404	0,121	0,123	0,121	70%	69%	70%
	\dot{x} (m/s)	1	1,404	1,317	1,298	1,228	6,2%	7,55%	13%
		2	3,478	1,306	1,337	1,410	62%	62%	59%
	\ddot{x} (m/s ²)	1	12,60	14,14	13,82	12,13	-12%	-10%	3,8%
		2	31,49	10,79	11,43	13,15	66%	64%	58%
AIS	x (m)	1	0,329	0,204	0,214	0,217	38%	35%	34%
		2	0,404	0,115	0,111	0,115	72%	72%	71%
	\dot{x} (m/s)	1	1,404	1,308	1,298	1,275	6,8%	7,6%	9,2%
		2	3,478	1,384	1,406	1,466	60%	60%	58%
	\ddot{x} (m/s ²)	1	12,60	12,31	12,10	11,61	2,3%	4,0%	7,8%
		2	31,49	12,22	12,52	13,27	61%	60%	58%
AIMS	x (m)	1	0,329	0,205	0,215	0,193	38%	35%	41%
		2	0,404	0,117	0,113	0,122	71%	72%	70%
	\dot{x} (m/s)	1	1,404	1,296	1,287	1,243	7,7%	8,3%	11%
		2	3,478	1,392	1,403	1,328	60%	60%	62%
	\ddot{x} (m/s ²)	1	12,60	11,89	11,64	10,94	5,7%	7,6%	13%
		2	31,49	12,69	12,97	16,57	60%	59%	47%

Fonte: Dados da pesquisa.

Na Estrutura 1, a técnica de acoplamento não foi efetiva para redução das respostas de velocidade e aceleração. Verifica-se, inclusive, aumentos de até 12 % na aceleração máxima absoluta na Estrutura 1, quando se aplica o dispositivo VDI. Contudo, o amortecedor VDI_{ACL} resultou em decréscimo da aceleração absoluta

Tabela 4.29 – Respostas *rms* máximas do Caso 2 – Northridge.

Disp.	Resposta	Estr.	Resultados <i>rms</i> máximos				Diferença (%)		
			Não Acompl.	Acompl. DRP	Acompl. ENG	Acompl. ACL			
VD	x (m)	1	0,086	0,046	0,046	0,046	47%	47%	47%
		2	0,094	0,022	0,022	0,023	76%	76%	76%
	\dot{x} (m/s)	1	0,360	0,236	0,234	0,232	35%	35%	36%
		2	0,677	0,155	0,157	0,162	77%	77%	76%
	\ddot{x} (m/s ²)	1	2,183	1,618	1,604	1,588	26%	27%	27%
		2	5,230	1,349	1,369	1,454	74%	74%	72%
VDI	x (m)	1	0,086	0,043	0,044	0,046	50%	49%	47%
		2	0,094	0,027	0,026	0,023	71%	72%	75%
	\dot{x} (m/s)	1	0,360	0,235	0,233	0,232	35%	35%	36%
		2	0,677	0,171	0,168	0,163	75%	75%	76%
	\ddot{x} (m/s ²)	1	2,183	1,806	1,763	1,596	17%	19%	27%
		2	5,230	1,286	1,308	1,443	75%	75%	72%
AIS	x (m)	1	0,086	0,044	0,044	0,044	49%	49%	49%
		2	0,094	0,0256	0,0259	0,025	73%	72%	73%
	\dot{x} (m/s)	1	0,360	0,227	0,224	0,222	37%	38%	38%
		2	0,677	0,168	0,171	0,174	75%	75%	74%
	\ddot{x} (m/s ²)	1	2,183	1,615	1,596	1,563	26%	27%	28%
		2	5,230	1,390	1,430	1,517	73%	73%	71%
AIMS	x (m)	1	0,086	0,044	0,044	0,048	49%	48%	44%
		2	0,094	0,0261	0,0269	0,023	72%	71%	75%
	\dot{x} (m/s)	1	0,360	0,226	0,224	0,234	37%	38%	35%
		2	0,677	0,171	0,176	0,185	75%	74%	73%
	\ddot{x} (m/s ²)	1	2,183	1,587	1,569	1,499	27%	28%	31%
		2	5,230	1,404	1,438	1,873	73%	73%	64%

Fonte: Dados da pesquisa.

Na atenuação das respostas *rms* máximas o sistema acoplado apresentou um bom desempenho. Ambas as estruturas exibiram uma redução significativa das respostas.

Nas respostas de deslocamento relativo máximo entre pavimentos, o dispositivo VDI demonstra performance inferior aos outros dispositivos nas análises DRP e ENG. Entretanto, utiliza-se de somente um amortecedor para controle do sistema de vibrações. Na análise ACL,

o dispositivo VDI alcança o mesmo desempenho do VD, porém, o elemento *inertor*, em si, não acrescenta benefícios no controle.

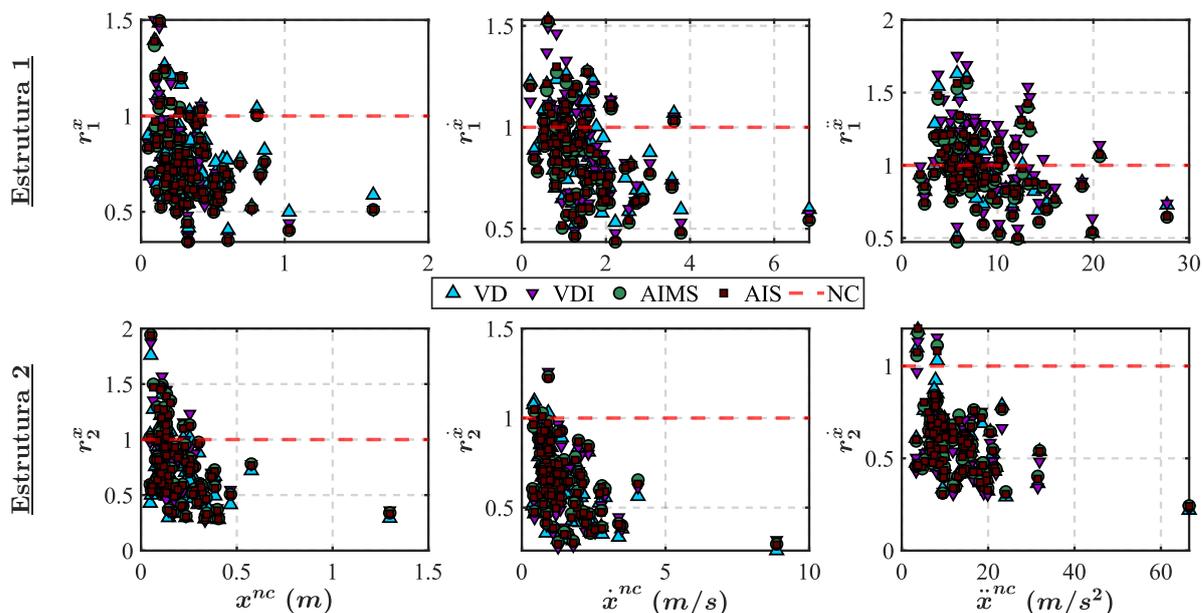
Tabela 4.30 – Deslocamento relativo máximo entre pavimentos Caso 2 – Northridge.

Disp.	Estr.	Δ_{nc}	Δ_{acopl} PSO	Δ_{acopl} ENG	Δ_{acopl} ACL	Diferença (%)		
VD	1	0,0709	0,0549	0,0548	0,0542	23%	23%	24%
	2	0,1324	0,0468	0,0483	0,0569	65%	64%	57%
VDI	1	0,0709	0,0612	0,0600	0,0545	14%	15%	23%
	2	0,1324	0,0479	0,0455	0,0562	64%	66%	58%
AIS	1	0,0709	0,0575	0,0571	0,0555	19%	19%	22%
	2	0,1324	0,0473	0,0488	0,0539	64%	63%	59%
AIMS	1	0,0709	0,0564	0,0560	0,0567	20%	21%	20%
	2	0,1324	0,0485	0,0495	0,0566	63%	63%	57%

Fonte: Dados da pesquisa.

Por fim, verificar o desempenho da técnica de acoplamento estrutural no Caso 2, são apresentados nas Figura 4.18, Figura 4.19 e Figura 4.20 os resultados das análises DRP, ENG e ACL, respectivamente, em relação às razões de resposta dinâmica máximas absolutas determinadas para os diferentes registros de acelerações sísmicas.

Figura 4.18 – Razões de resposta dinâmica máximas absolutas – Caso 2 – DRP.

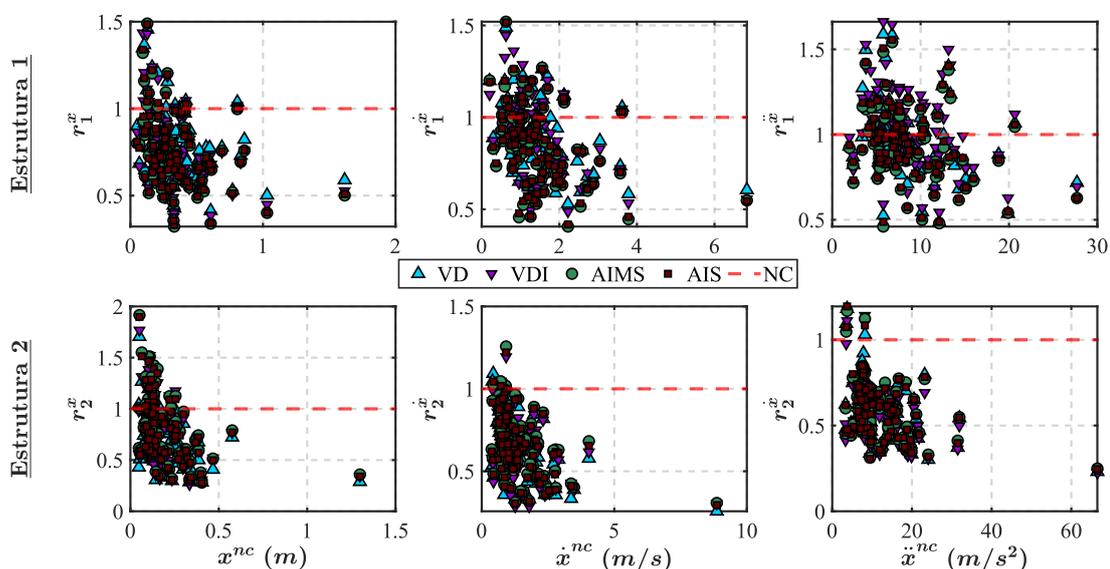


Fonte: Dados da pesquisa.

É possível perceber que os valores das respostas absolutas obtidos pelas análises DRP e ENG são similares. O número de solicitações externas que culminam em aumento nas respostas é equilibrado entre as estruturas 1 e 2. Esse comportamento também ocorre na análise ACL, porém, o dispositivo $AIMS_{ACL}$ tem mais destaque e pode reduzir a performance de controle das respostas em ambas as estruturas.

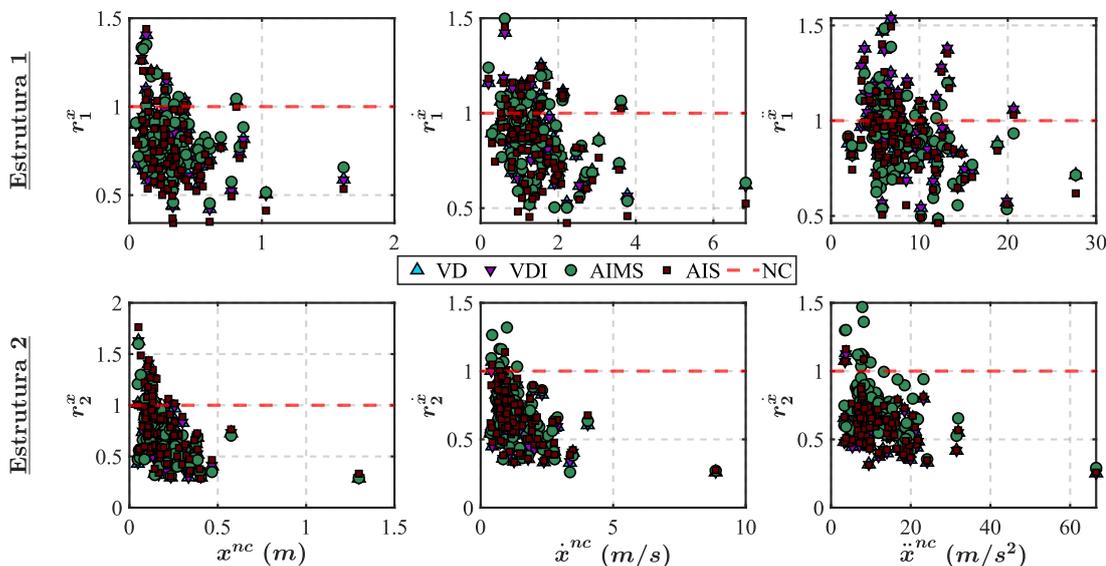
Assim como constatado no Caso 1, os DBI têm a tendência de apresentar melhor desempenho no controle que o dispositivo VD. Nesse Caso 2, entretanto, o dispositivo VDI foi menos eficiente que o outros DBI.

Figura 4.19 – Razões de resposta dinâmica máximas absolutas – Caso 2 – ENG.



Fonte: Dados da pesquisa.

Figura 4.20 – Razões de resposta dinâmica máximas absolutas – Caso 2 – ACL.



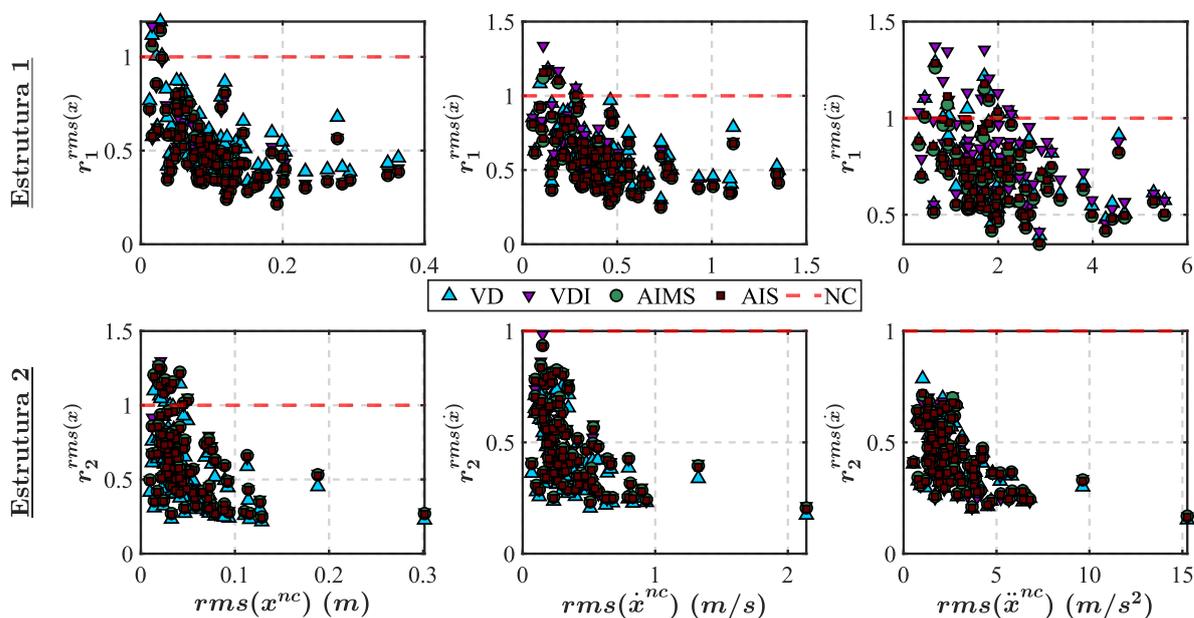
Fonte: Dados da pesquisa.

As razões de resposta dinâmica do *rms* máximo do deslocamento, velocidade e aceleração estão ilustradas na Figura 4.21 para a análise DRP. Nas Figura 4.22 e Figura 4.23 encontram-se as razões de resposta *rms* das análises ENG e ACL, respectivamente.

Nota 9

- O dispositivo AIMS é indicado em caso de vantagens construtivas.
- No Caso 2, o dispositivo AIS exibiu destaque na redução das vibrações.

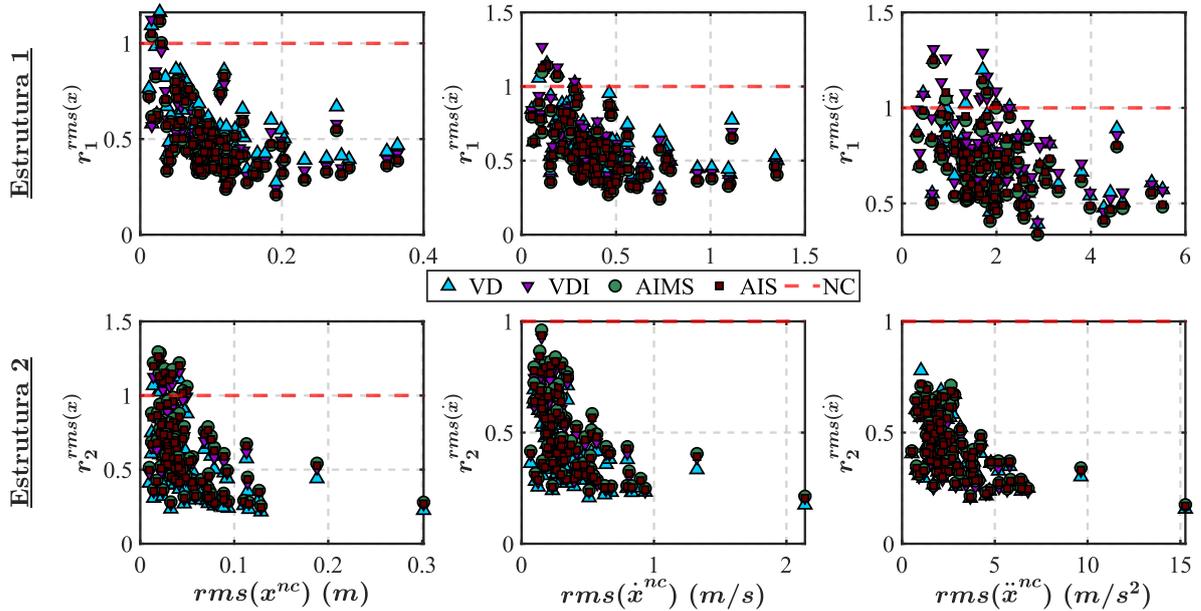
Figura 4.21 – Razões de resposta dinâmica *rms* máximas – Caso 2 – DRP.



Fonte: Dados da pesquisa.

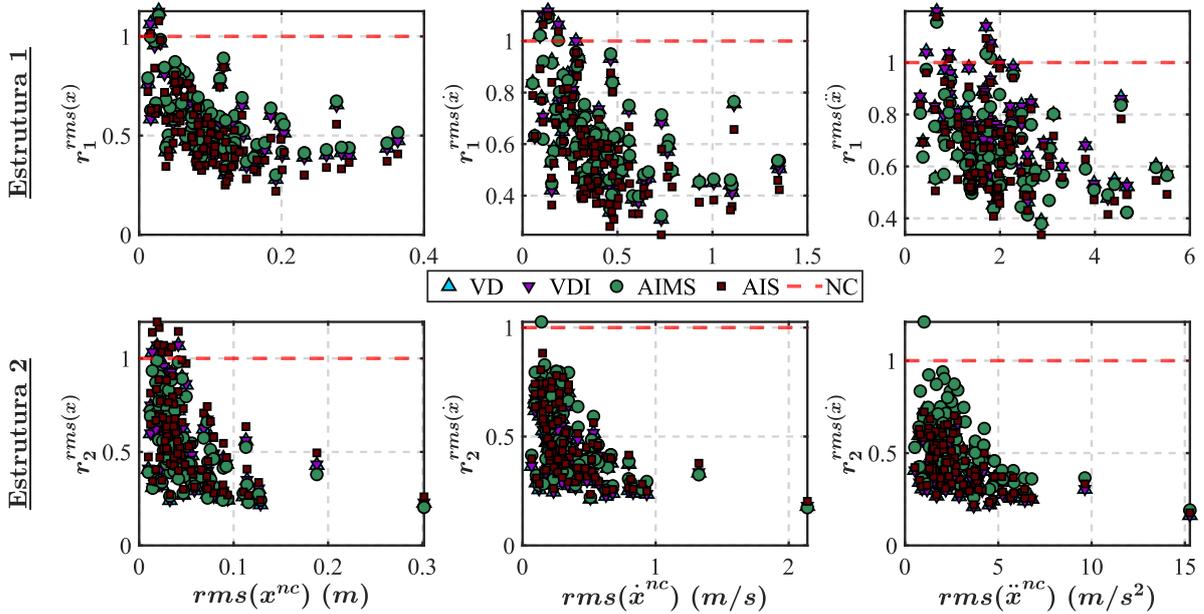
O dispositivo VD obteve desempenho inferior na atenuação dos valores de *rms* do deslocamento na Estrutura 1 nas análises DRP e ENG. Na análise ACL, o dispositivo AIS apresenta melhor performance na redução do *rms* da Estrutura 1. Já o AIMS_{ACL} apenas é indicado para reduzir as respostas dessa estrutura na técnica de acoplamento estrutural caso sua alocação no pavimento 2 (o qual foi determinada na otimização) seja uma vantagem construtiva para os edifícios.

Figura 4.22 – Razões de resposta dinâmica *rms* máximas – Caso 2 – ENG.



Fonte: Dados da pesquisa.

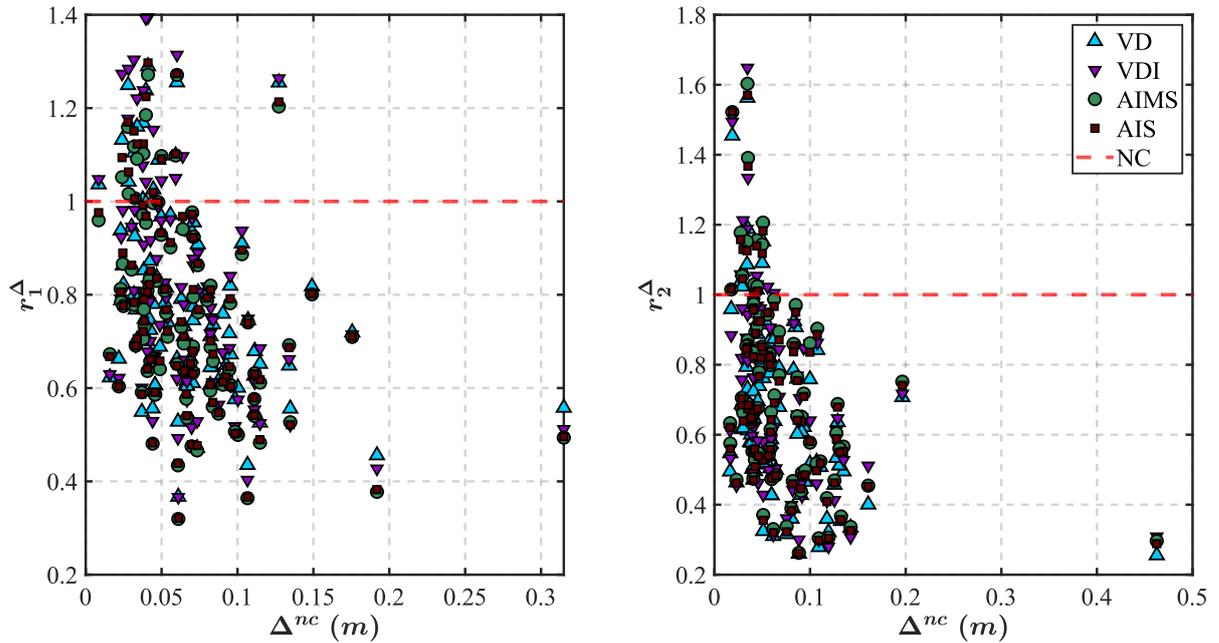
Figura 4.23 – Razões de resposta dinâmica *rms* máximas – Caso 2 – ACL.



Fonte: Dados da pesquisa.

Os resultados das razões de resposta dinâmica dos deslocamentos relativos entre pavimentos (Δ) máximos para as análises DRP, ENG e ACL, respectivamente, são apresentados nas Figura 4.24, Figura 4.25 e Figura 4.26.

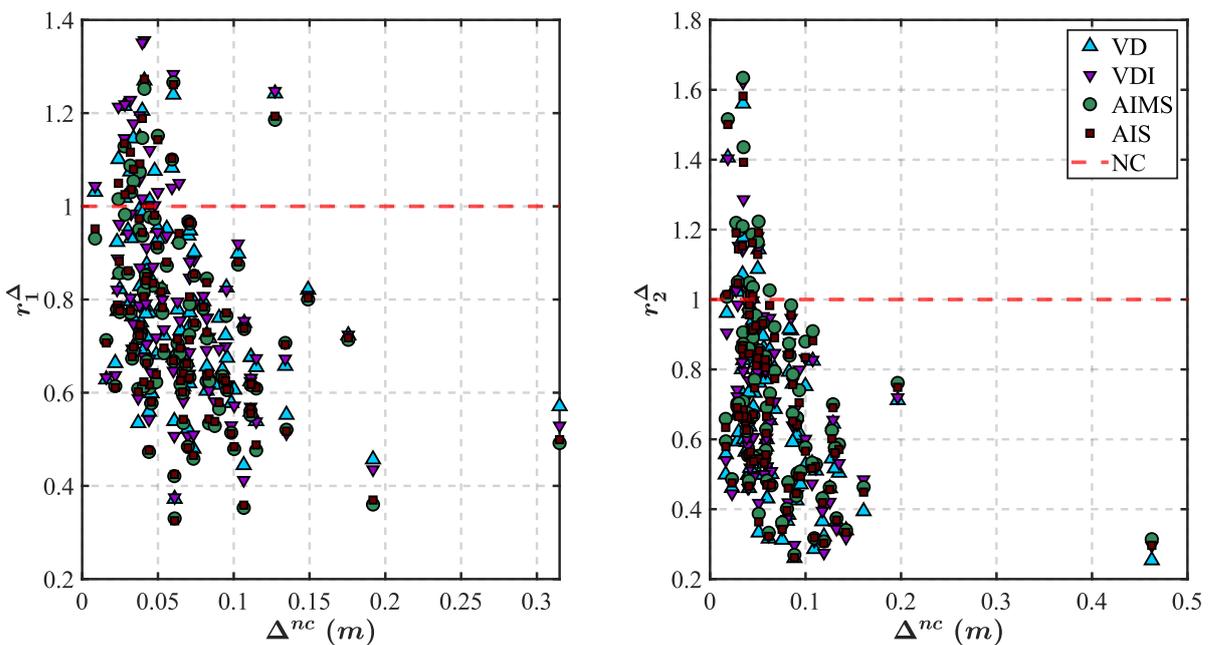
Figura 4.24 – Razões de resposta dinâmica Δ máximos – Caso 2 – DRP.



Fonte: Dados da pesquisa.

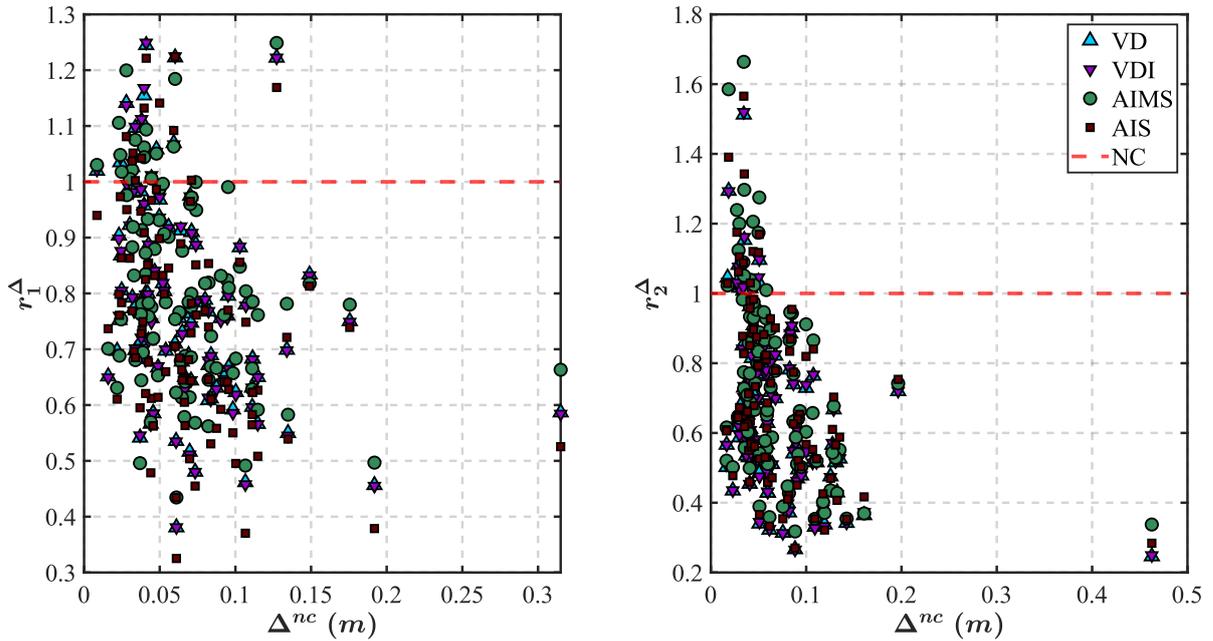
Nas razões de resposta dinâmica dos valores de Δ , nota-se que o dispositivo VDI apresentou a performance mais desfavorável para o controle da Estrutura 1 nas três análises de otimização. Por sua vez, o dispositivo AIS foi o que obteve a maior redução dos valores de Δ nessa estrutura. Na Estrutura 2 o dispositivo VD foi o mais eficiente. Esse resultado é análogo ao obtido no Caso 1.

Figura 4.25 – Razões de resposta dinâmica Δ máximos – Caso 2 – ENG.



Fonte: Dados da pesquisa.

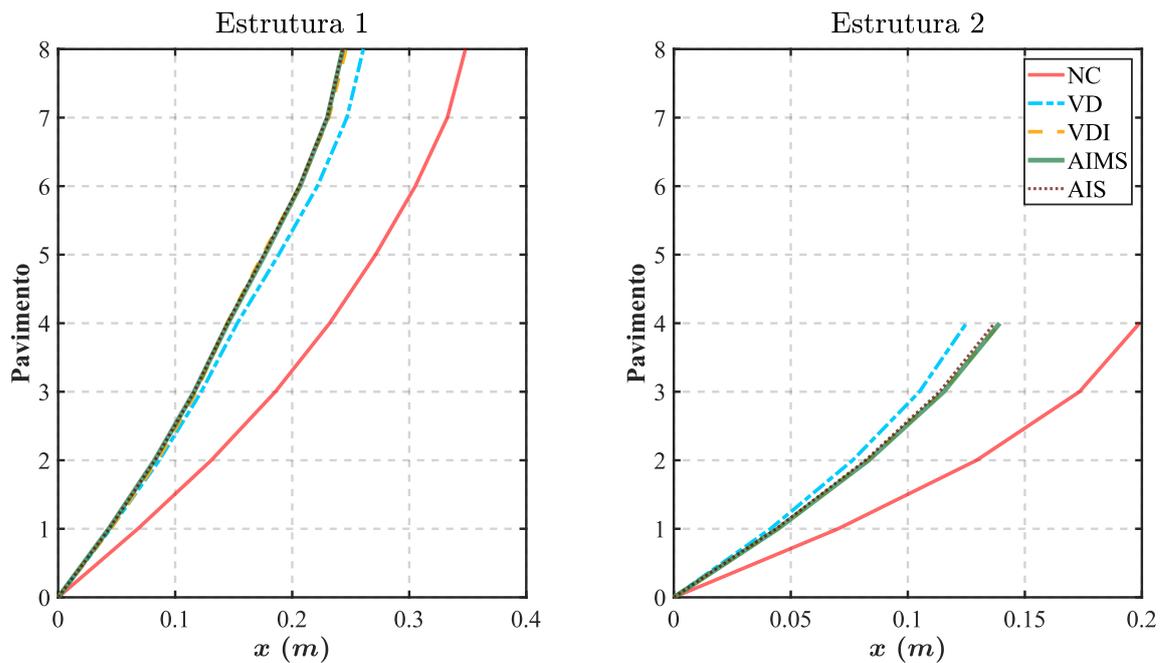
Figura 4.26 – Razões de resposta dinâmica Δ máximos – Caso 2 – ACL.



Fonte: Dados da pesquisa.

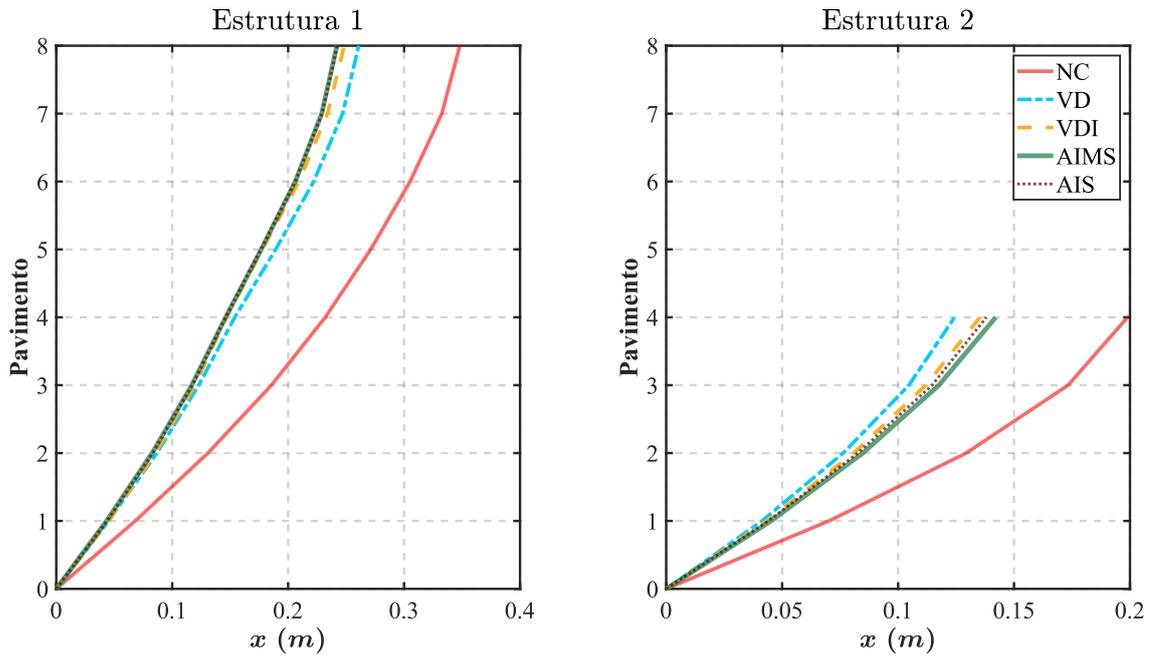
Por fim, são apresentadas as médias dos deslocamentos máximos absolutos em cada pavimento resultantes das respostas do sistema acoplado para os 100 registros de acelerações sísmicas. Nas Figura 4.27, Figura 4.28 e Figura 4.29 encontram-se os resultados da média dos deslocamentos absolutos por pavimento para as análises DRP, ENG e ACL, respectivamente.

Figura 4.27 – Média dos deslocamentos absolutos máximos por pavimento – Caso 2 – DRP.



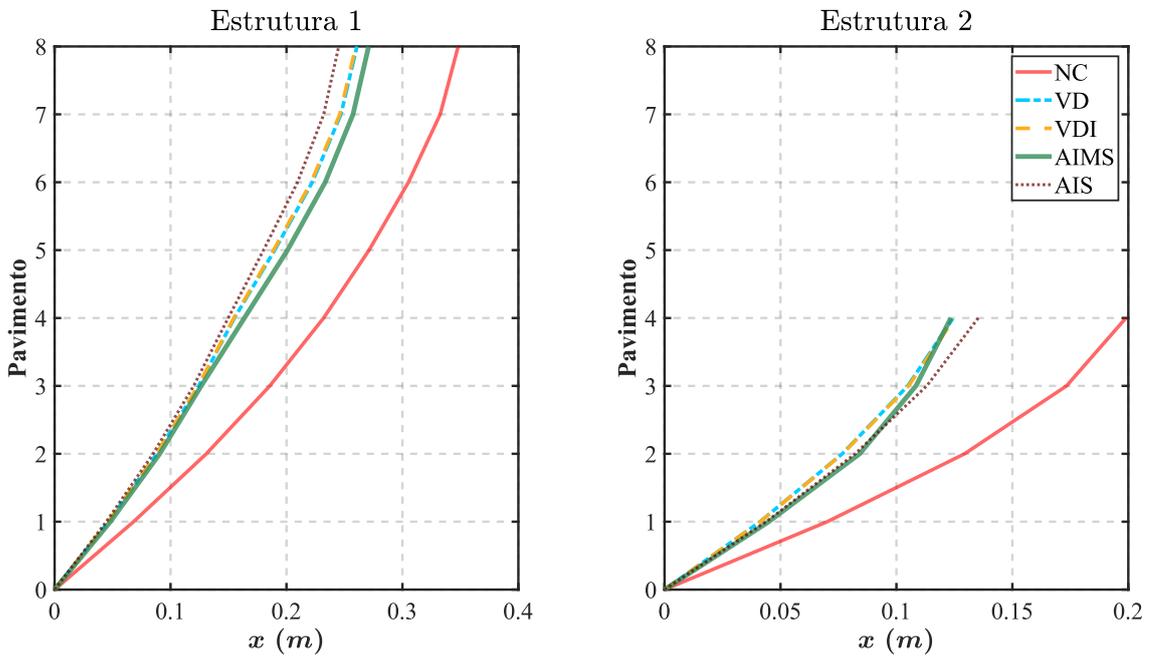
Fonte: Dados da pesquisa.

Figura 4.28 – Média dos deslocamentos absolutos máximos por pavimento – Caso 2 – ENG.



Fonte: Dados da pesquisa.

Figura 4.29 – Média dos deslocamentos absolutos máximos por pavimento – Caso 2 – ACL.



Fonte: Dados da pesquisa.

Nas análises DRP e ENG, os dispositivos AIS e AIMS exibiram melhor performance no controle dos deslocamentos da Estrutura 1. Na análise ACL, o dispositivo AIS foi mais eficiente. Na Estrutura 2, por outro lado, o dispositivo VD apresentou melhor desempenho. Na análise ACL, o dispositivo AIMS beneficia mais a Estrutura 2, mesmo estando sob a Estrutura 1.

Os dois casos apresentados na análise numérica demonstraram que a otimização através da análise estocástica traz resultados promissores para resolução do problema de estruturas acopladas com DBI. O desempenho da técnica é dependente das características dinâmicas das estruturas e do conteúdo de frequências da excitação externa.

No Caso 1, a frequência da Estrutura 2 e sua alta rigidez foram determinantes para o desempenho do acoplamento estrutural. De um ponto de vista real, usualmente, prédios altos vão apresentar uma frequência fundamental inferior à expressa por esse modelo numérico. Entretanto, o comportamento retratado nos resultados do Caso 1 indica que uma otimização baseada nas acelerações pode ser mais eficiente, pois favorece ambas as estruturas. Também, não se recomenda o uso de um dispositivo AIMS, pois além da capacidade de amplificar as respostas dinâmicas em alguns casos, leva ao incremento de uma massa à estrutura. Assim, é mais interessante o uso de dispositivos VDI ou AIS.

Os resultados do Caso 2 apontam a melhor escolha sendo o dispositivo AIS. As três funções objetivo expressam bons resultados, todavia, para DBI é preferível o uso da DRP ou ENG, pois trazem mais resultados mais confiáveis para diferentes solicitações.

Para compreender na prática qual o efeito de DBI na técnica de acoplamento, é realizado, a seguir, um estudo experimental. Nesse estudo o elemento *inertter* é aplicado de forma pura, através de um dispositivo *inertter* do tipo *rack-and-pinion*.

5 ESTUDO EXPERIMENTAL COM DISPOSITIVO INERTER

Foi constatado no estudo numérico que a performance da técnica de acoplamento estrutural está ligada principalmente às características dinâmicas das estruturas, do elemento de conexão e da excitação externa.

Em razão disso, esse estudo experimental tem como objetivo estudar a eficiência da técnica de acoplamento no controle de vibrações quando duas estruturas adjacentes são conectadas com um dispositivo baseado em *inertor*. Os modelos experimentais, do tipo *shear frame*, contêm 3 pavimentos cada e são submetidos a um movimento oscilatório gerado por uma mesa de vibração. Os ensaios são executados no Laboratório de Estruturas (LABEST) da Universidade de Brasília (UnB).

É realizado um estudo numérico prévio para determinar, de forma aproximada, quais as características mecânicas necessárias para o elemento de conexão. De antemão, era previsto que o dispositivo possuísse propriedades físicas que seriam capazes de influenciar a resposta modal dos modelos estruturais experimentais, em razão da pouca massa apresentada por eles. Assim, houve a necessidade da construção do protótipo do dispositivo de conexão de forma antecipada para ser parte componente da massa da estrutura.

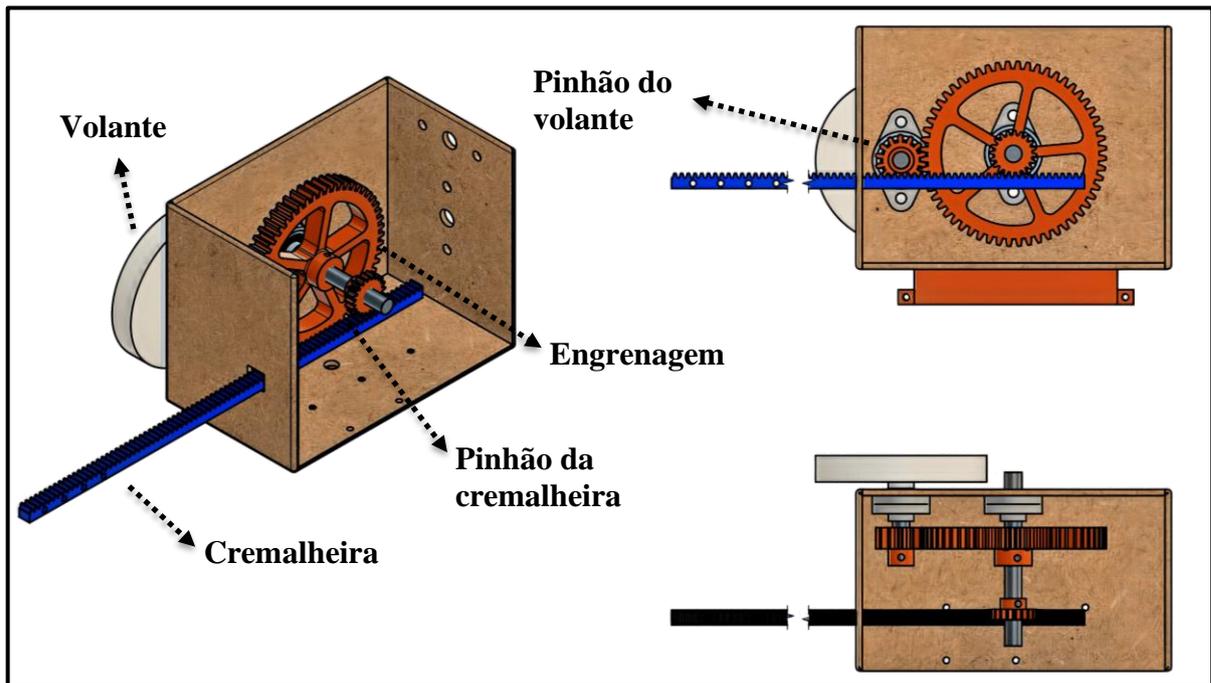
Inicialmente foi realizado um estudo experimental modal para determinar as frequências naturais e modos de vibração das estruturas. Esse estudo foi realizado através de ensaios de vibração livre. Para garantir que os modelos numérico e experimental fossem correlacionados foram aplicados a porcentagem de variação de frequência (FER) e o *Modal Assurance Criterion* (MAC). Com os modelos numéricos validados é possível obter através de otimização numérica, as propriedades ótimas do *inertor*.

Na mesa de vibração a amplitude e frequência da excitação são conhecidas. Assim, os modelos são parafusados na mesa e submetidos a movimentos oscilatórios. O dispositivo *inertor* foi projetado e construído para uso nessa pesquisa. Nos ensaios, ele foi alocado no último pavimento das estruturas. Em razão da massa do dispositivo em relação com a massa das estruturas ser significativa, ele foi considerado como parte integrante do pavimento. Foram obtidas as respostas de aceleração para o sistema sem acoplamento, acoplado sem o volante do *inertor* e acoplado com o volante. Dessa forma, pode-se observar a eficiência da técnica de acoplamento estrutural e do dispositivo *inertor* no controle de vibrações.

5.1 DISPOSITIVO INERTER EXPERIMENTAL

O dispositivo *inertor* foi desenvolvido através dos modelos *rack-and-pinion* presentes na literatura. Na Figura 5.1 é possível visualizar as características físicas de dispositivos *inertor* do tipo *rack-and-pinion*.

Figura 5.1 – Características físicas de dispositivos *inertor rack-and-pinion*.



Fonte: Elaboração própria.

Para esse modelo de *inertor* a equação da inércia b é dada por:

$$b = \eta^2 I \quad (5.1)$$

$$\eta = \frac{r_e}{r_{pc} r_{pv}} \quad \text{e} \quad I = \frac{1}{2} m_v r_v^2$$

em que: r_{pc} , r_e e r_{pv} são, respectivamente, o raio do pinhão da cremalheira, o raio da engrenagem e o raio do pinhão do volante; m_v é a massa volante e r_v o raio do volante.

Madhamshetty e Manimala (2018) realizaram um estudo para a caracterização de dispositivos *inertor* submetidos a baixas frequências (< 5 Hz). Através de um desenvolvimento analítico, os autores elaboraram uma equação para a inércia de dispositivos *rack-and-pinion* que considera as propriedades inerciais das peças que compõem o mecanismo. A inércia é, então, dada pela seguinte expressão:

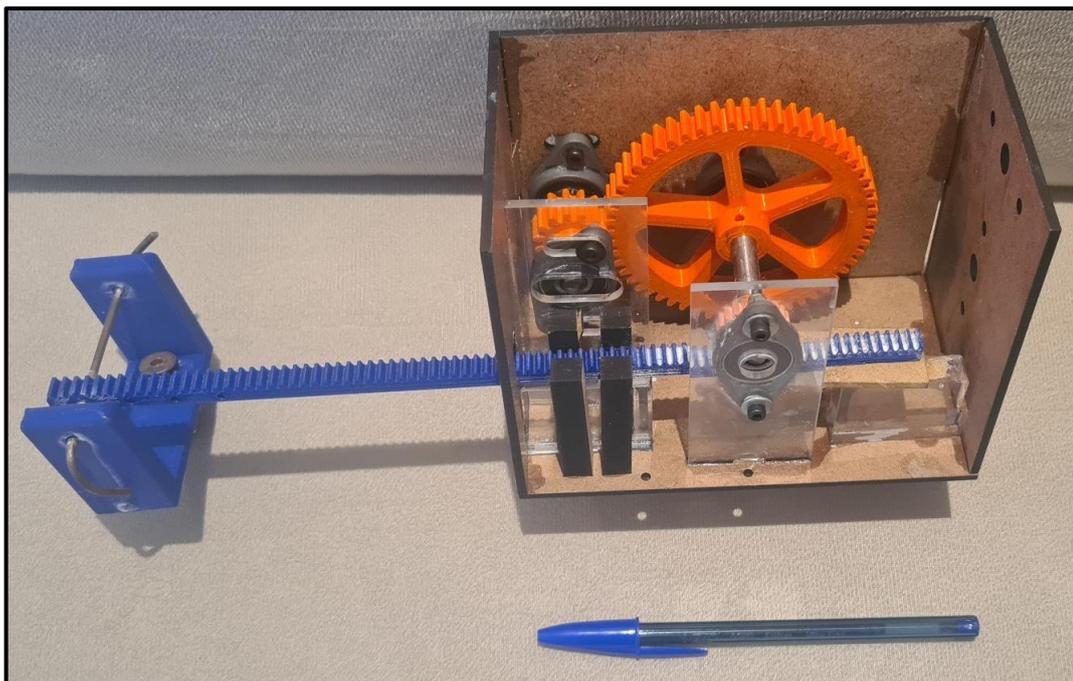
$$b = \left[\frac{\left(\frac{m_{pv} r_{pv}^2}{2} + m_v k^2 \right) r_e^2}{r_{pc}^2 r_{pv}^2} + \frac{(m_{pc} r_{pc}^2 + m_e r_e^2)}{2 r_{pc}^2} + m_c \right] \quad (5.2)$$

em que: m_{pc} , m_e , m_{pv} e m_c são, respectivamente, a massa do pinhão da cremalheira, a massa da engrenagem, massa do pinhão do volante e a massa da cremalheira; k é o raio de giro do volante dado por $r_v/\sqrt{2}$.

Baseado na Eq. (5.2) foi elaborado o projeto do dispositivo *inertor* com auxílio da Empresa Júnior de Engenharia Mecânica da UnB (TECMEC). Em razão da pequena massa dos modelos estruturais, o projeto teve como prioridade produzir um dispositivo que fosse o mais leve possível. Também, uma vez que as engrenagens e cremalheira são produzidas por impressão 3D, foi necessário adequar o tamanho das peças com a precisão da impressora.

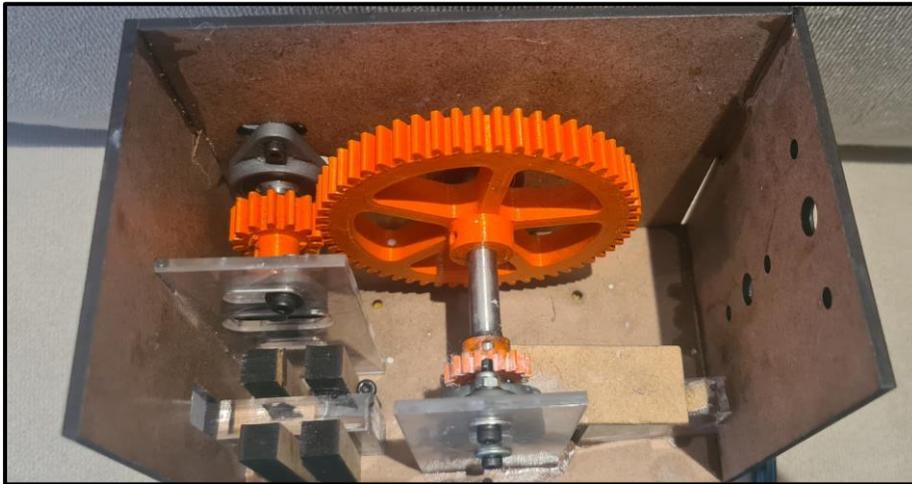
A engrenagem, pinhões e cremalheira foram construídas em impressão 3D, com plástico PLA, do Laboratório Aberto de Brasília (LAB) na UnB e da TECMEC. A caixa foi construída em MDF cortada a laser. Os eixos são em Aço 1045 cromado com 8 mm de diâmetro e os mancais modelo KFL08 em liga de zinco. Ademais, foram necessárias peças em acrílico para evitar balanço nos eixos e como elementos de construção. Nas Figura 5.2, Figura 5.3 e Figura 5.4 pode-se visualizar imagens e detalhes do dispositivo *inertor rack-and-pinion* construído.

Figura 5.2 – Dispositivo *inertor*.



Fonte: Autoria própria.

Figura 5.3 – Partes integrantes do dispositivo *inertor*.



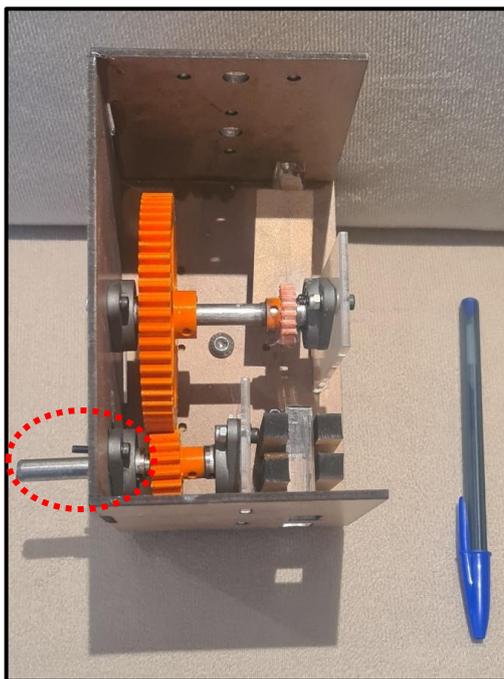
Visão superior do sistema de engrenagens.

Cremalheira com o suporte de fixação na estrutura.

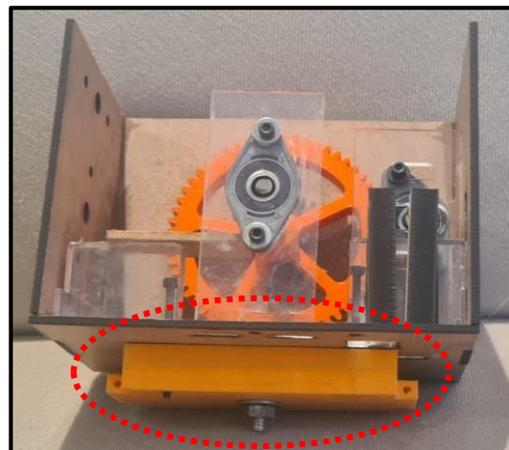


Fonte: Autoria própria.

Figura 5.4 – Detalhes do *inertor*: a) eixo em que o volante é conectado; b) sistema para conexão do dispositivo à estrutura.



a)



b)

Fonte: Autoria própria.

No APÊNDICE A está ilustrado o desenho técnico com os detalhes do dispositivo, bem como as suas medidas.

Sem o volante, o dispositivo possui uma **massa de 478 g**. Na Tabela 5.1 são detalhadas as características físicas dos principais componentes do dispositivo.

Tabela 5.1 – Características dos componentes principais do *inertor*.

Componente	Dimensão (mm)	Tipo	Massa (g)
Engrenagem	42	Raio	32
Pinhão da cremalheira	10	Raio	2
Pinhão do volante	10,5	Raio	6
Cremalheira	260	Comprimento	20

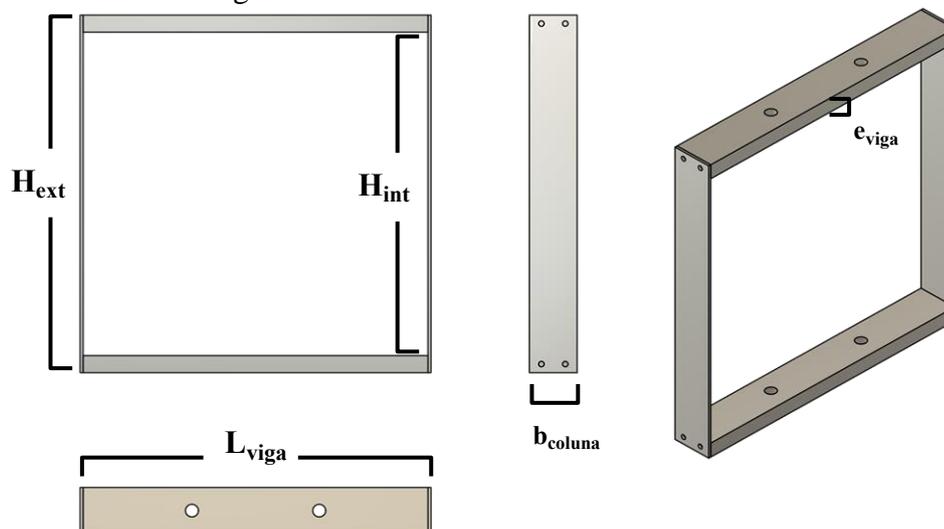
Fonte: Dados da pesquisa.

Ressalta-se que o projeto priorizou um dispositivo leve, porém, que fosse robusto o suficiente para suportar os movimentos oscilatórios.

5.2 MODELOS ESTRUTURAIS ANALISADOS

As estruturas aplicadas nessa pesquisa são construídas a partir da união de módulos que consistem em duas colunas em aço inox e duas vigas rígidas em alumínio, conforme apresentado na Figura 5.5. Cada estrutura é constituída por três módulos ligados por parafusos e porcas.

Figura 5.5 – Módulo do sistema estrutural.



Fonte: Elaboração própria.

Os módulos 4, 5 e 6 foram utilizados por Peña (2017) e utilizam aço inox (ferrítico liga 430) com módulo de elasticidade $E = 210$ GPa. Já os módulos 1, 2 e 3 foram construídos nessa pesquisa com as mesmas dimensões, porém, as colunas são de aço inox (austenítico liga 304) com módulo de elasticidade $E = 193$ GPa. Os valores dos módulos de elasticidade foram obtidos nos manuais do fabricante, não sendo realizados ensaios para determiná-los. As características físicas das colunas dos módulos são apresentadas na Tabela 5.2 e das vigas na Tabela 5.3. Por fim, na Tabela 5.4 são descritas as massas de cada módulo. Os módulos utilizados em pesquisas anteriores estão destacados em verde.

Tabela 5.2 – Características das colunas.

Módulo	Coluna esquerda				Coluna direita			
	e (mm)	b (mm)	H _{int} (mm)	H _{ext} (mm)	e (mm)	b (mm)	H _{int} (mm)	H _{ext} (mm)
1	1,5	25,2	180,0	200,0	1,5	25,2	180,0	200,0
2	1,5	25,2	181,0	200,0	1,5	25,2	180,0	200,0
3	1,5	25,2	180,5	200,0	1,5	25,2	180,0	200,0
4	1,5	25,7	180,7	200,4	1,5	25,6	181,1	200,3
5	1,5	25,7	181,1	200,4	1,5	25,7	180,9	200,4
6	1,5	25,7	181,8	200,9	1,5	25,8	180,4	200,1

Fonte: Dados da pesquisa.

Tabela 5.3 – Características das vigas.

Módulo	Viga superior			Viga inferior		
	b (mm)	e (mm)	L (mm)	b (mm)	e (mm)	L (mm)
1	25,3	9,4	188,0	25,3	9,4	188,0
2	25,3	9,4	188,0	25,3	9,4	188,5
3	25,3	9,4	187,5	25,3	9,4	188,0
4	25,4	9,7	188,5	25,4	9,5	188,2
5	25,4	9,6	188,3	25,4	9,6	188,1
6	25,4	9,6	188,0	25,5	9,6	188,2

Fonte: Dados da pesquisa.

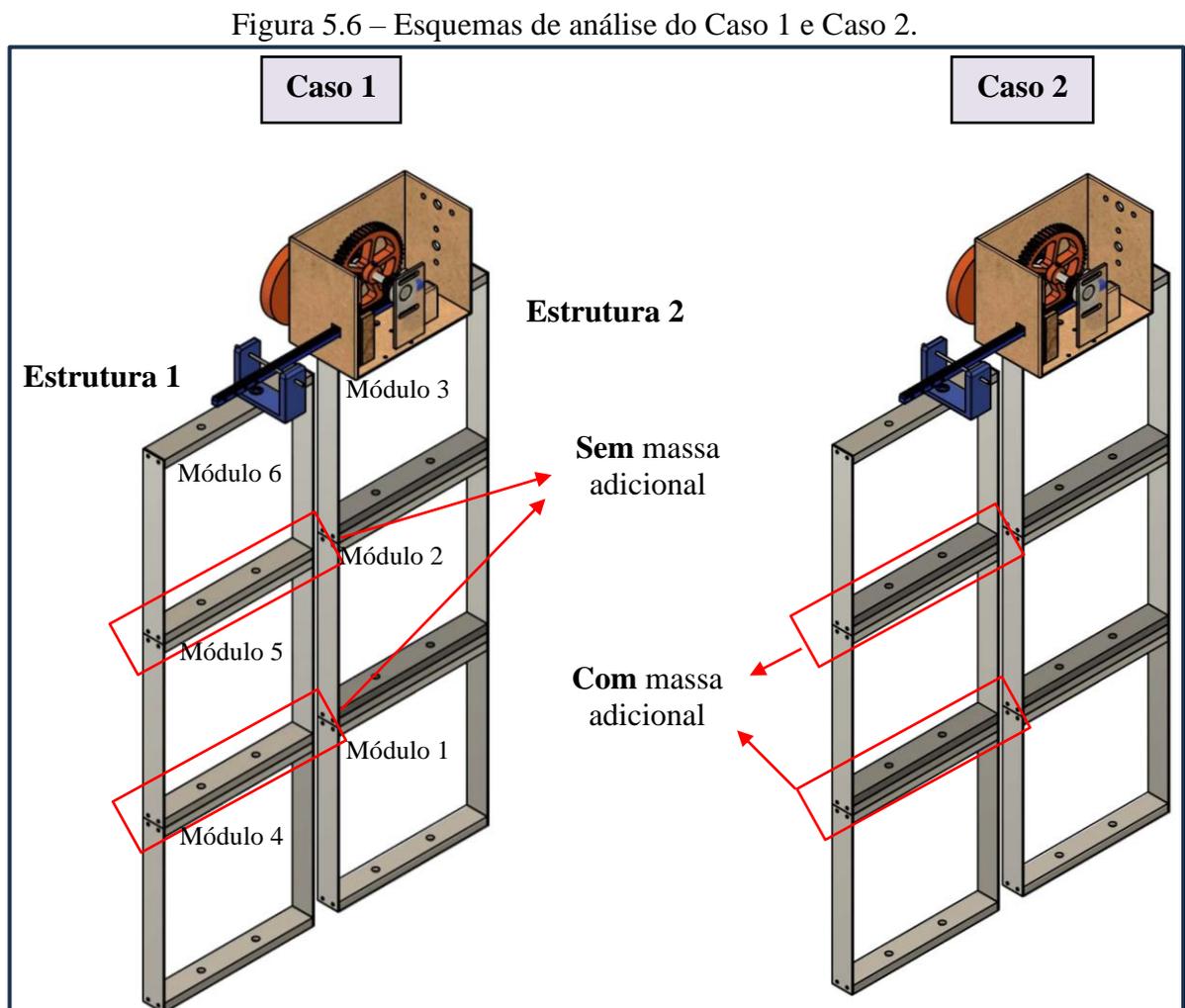
Tabela 5.4 – Massa dos módulos.

Módulo	Massa (kg)
1	0,351
2	0,353
3	0,351
4	0,365
5	0,366
6	0,365

Fonte: Dados da pesquisa.

A Estrutura 1 fica à esquerda nos ensaios e é construída com os módulos 4, 5 e 6 (em sequência de baixo para cima). Já a Estrutura 2 é construída com a junção dos módulos 1, 2 e 3 (também em sequência de baixo para cima) e fica à direita nos ensaios.

Com objetivo de aumentar a massa de cada pavimento são parafusadas junto aos pavimentos 1 e 2 chapas de aço com 393 g cada na Estrutura 2. Na Estrutura 1 são utilizados dois casos: no primeiro não tem chapas de aço adicionais; no segundo são colocadas chapas de aço nos pavimentos 1 e 2, com 392 g e 391 g, respectivamente. Na Figura 5.6 pode-se observar um esquema dos Casos 1 e 2.



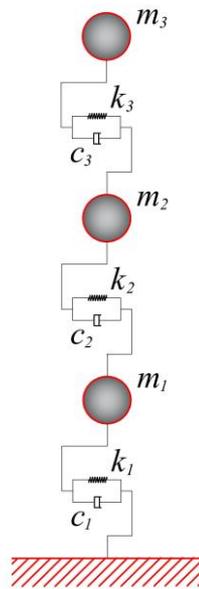
Fonte: elaboração própria.

Com essas características e com os pavimentos bem conectados e firmes, considera-se que o sistema estrutural é do tipo *shear frame*, no qual a rigidez é dada pelas colunas e a massa é concentrada nas vigas.

5.2.1 Modelos numéricos e análise modal das estruturas

Com o objetivo de comparar com a análise modal experimental são apresentados os modelos numéricos das estruturas analisadas. O dispositivo *inertor* descrito anteriormente está acoplado no terceiro pavimento da Estrutura 2. Em razão da massa do dispositivo (0,478 kg), foi considerado que ele faz parte do pavimento, sendo acrescentada no modelo numérico dessa estrutura. Também, são adicionadas as massas das porcas, arruelas e parafusos utilizados na união de cada pavimento (0,023 kg). O modelo numérico é apresentado na Figura 5.7.

Figura 5.7 – Modelo numérico das estruturas ensaiadas.



Fonte: Elaboração própria.

Por ser uma estrutura *shear frame* com a base considerada engastada, a rigidez de cada coluna i é dada pela equação:

$$k_i = 12 \frac{EI_i}{L_i^3} \quad (5.4)$$

As matrizes de massa e rigidez da Estrutura 1, para os Casos 1 e 2, são as seguintes:

$$\mathbf{M}_1^1 = \begin{bmatrix} 0,389 & & \\ & 0,388 & \\ & & 0,183 \end{bmatrix} (kg) \quad \text{e} \quad \mathbf{M}_1^2 = \begin{bmatrix} 0,783 & & \\ & 0,779 & \\ & & 0,183 \end{bmatrix} (kg) \quad (5.5)$$

$$\mathbf{K}_1^1 \text{ e } \mathbf{K}_1^2 = \begin{bmatrix} 9,4173 & -4,5401 & 0 \\ -4,5401 & 9,4255 & -4,8854 \\ 0 & -4,8854 & 4,8854 \end{bmatrix} \times 10^3 (N/m) \quad (5.6)$$

Na Estrutura 2, as matrizes de massa e rigidez são:

$$\mathbf{M}_2 = \begin{bmatrix} 0,768 & & \\ & 0,768 & \\ & & 0,654 \end{bmatrix} (kg) \quad (5.7)$$

$$\mathbf{K}_2 = \begin{bmatrix} 8,6366 & -4,1472 & 0 \\ -4,1472 & 8,6193 & -4,4721 \\ 0 & -4,4721 & 4,4721 \end{bmatrix} \times 10^3 (N/m) \quad (5.8)$$

As matrizes de amortecimento são obtidas através do método de Rayleigh, sendo as taxas de amortecimento obtidas experimentalmente e calculadas através do *software* ARTeMIS Modal®. A determinação frequências naturais e modos de vibração é realizada através da solução de um problema de autovalor e autovetor:

$$([\mathbf{K}] - \omega^2[\mathbf{M}])\{\Psi\} = \{\mathbf{0}\} \quad (5.9)$$

em que a matriz \mathbf{M} é a matriz de massa da estrutura; \mathbf{K} é a matriz de rigidez da estrutura.

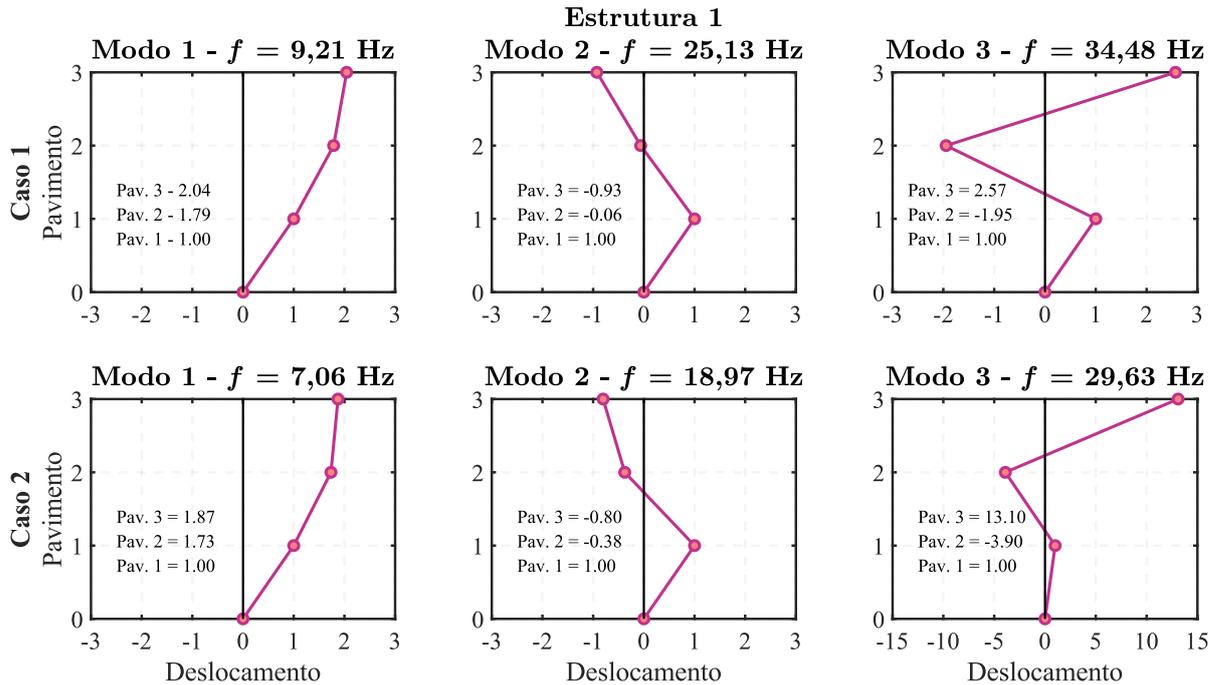
A solução da Eq. (5.9) é composta por “ n ” autovalores ω_r^2 e “ n ” autovetores $\{\Psi\}_r$ ($r = 1, 2, \dots, n$). A raiz quadrada dos autovalores são as frequências naturais do sistema e os autovetores os modos de vibração. Assim, as frequências naturais das Estruturas 1 e 2 são apresentadas na Tabela 5.5. Os modos de vibração são ilustrados nas Figura 5.8 e Figura 5.9.

Tabela 5.5 – Frequências naturais das Estruturas 1 e 2.

Estrutura	Modo	Frequência (Hz)		
		1	2	3
1	Caso 1	9,21	25,13	34,48
	Caso 2	7,06	18,97	29,63
2		5,57	15,54	21,64

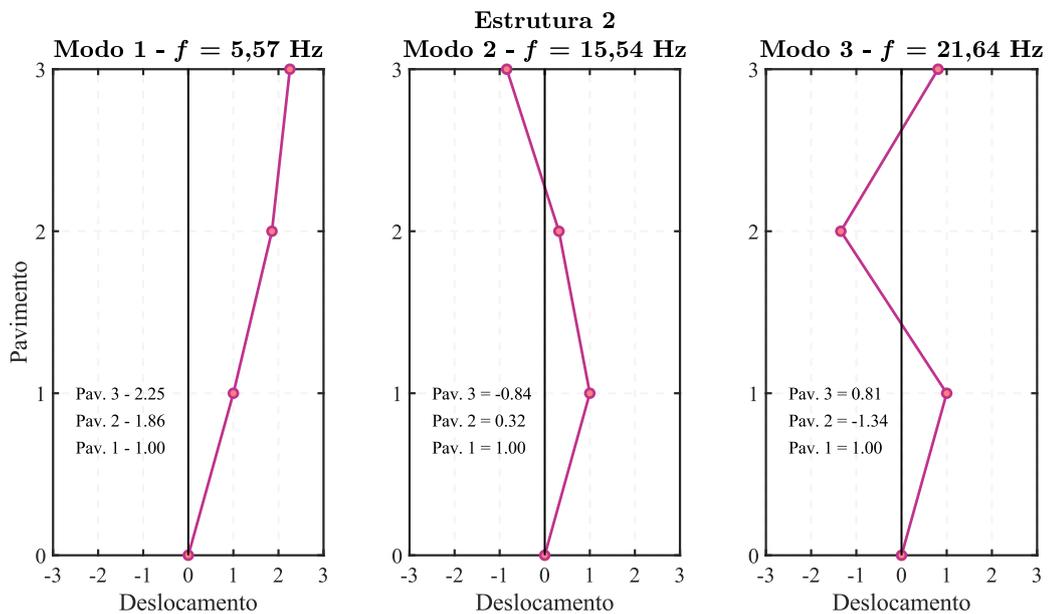
Fonte: Dados da pesquisa.

Figura 5.8 – Modos numéricos da Estrutura 1 – Casos 1 e 2.



Fonte: Dados da pesquisa.

Figura 5.9 – Modos numéricos da Estrutura 2.



Fonte: Dados da pesquisa.

Com os resultados apresentados é possível realizar a comparação com os dados obtidos experimentalmente, assim, verifica-se se é necessária a atualização do modelo numérico. Essa etapa é importante para se obter um modelo numérico fiel com objetivo de determinar os parâmetros ótimos do dispositivo *inertor*.

5.2.2 Identificação modal dos modelos experimentais

Para realizar os ensaios de vibração livre, os modelos foram fixados, através de parafusos, em um bloco de concreto com aproximadamente 400 kg. Os acelerômetros utilizados são da marca PCB Piezotronics e modelo 353B01. Esses acelerômetros têm uma massa de 10 g e uma sensibilidade de $\pm 5\%$ 20 mV/g (2,04 mV/(m/s²)) segundo informações do fabricante.

Os acelerômetros são conectados ao condicionador de sinal de ganho unitário IPC Modelo 482A22, que traduz a vibração da estrutura em pulsos elétricos e os envia para o aquisitor de sinais ADS2000, fabricado pela Lynx Tecnologia Eletrônica. Por fim, o software AqDados7 monitora e grava os registros das acelerações obtidos. Nas Figura 5.10 e Figura 5.11 estão fotos do sistema de aquisição montado e dos modelos com os acelerômetros fixados.

Figura 5.10 – Sistema de aquisição de dados.



Fonte: Autoria própria.

Figura 5.11 – Estrutura *shear frame* com acelerômetros.



Fonte: Autoria própria.

Como havia dois acelerômetros, o acelerômetro do último pavimento foi considerado fixo (de referência). Foram realizados 5 ensaios para cada situação. A frequência de amostragem foi de 200 Hz, ou seja, o sistema de aquisição registrava as acelerações em instantes de tempo 0,005 s.

Com os dados adquiridos (acelerações), utiliza-se o *software* ARTeMIS Modal[®] que, automaticamente, determina as frequências naturais, modos de vibração e razões de amortecimento das estruturas. Para isso, foi aplicado o método *Enhanced Frequency Domain Decomposition* (EFDD) oferecido pelo *software*.

A fim de comparar a diferença entre as frequências naturais obtidas numericamente e experimentalmente, utiliza-se a variação da frequência FER, dada por:

$$FER = \left| \frac{\omega_{num} - \omega_{exp}}{\omega_{exp}} \right|_n \quad (5.9)$$

onde: ω_{num} é a frequência natural numérica e ω_{exp} é a frequência natural experimental, ambas do modo n . Para verificar a semelhança dos modos de vibração numéricos e experimentais é aplicado o índice modal MAC (*Modal Assurance Criterion*), definido por:

$$MAC(g, h) = \frac{|\boldsymbol{\phi}_g^T \boldsymbol{\phi}_h|^2}{(\boldsymbol{\phi}_h^T \boldsymbol{\phi}_h)(\boldsymbol{\phi}_g^T \boldsymbol{\phi}_g)} \quad (5.10)$$

em que $\boldsymbol{\phi}_g$ é o conjunto dos modos de vibração g experimental e $\boldsymbol{\phi}_h$ dos modos de vibração h numéricos. O resultado desse índice é uma matriz com valores que variam entre 0 e 1. Se a relação linear existe, isto é, se os vetores se movem do mesmo jeito, entre dois vetores complexos, o valor do MAC deverá ser próximo de 1 (na diagonal). Se eles são linearmente independentes, então o valor do MAC será baixo, perto de zero. Pastor *et al.* (2012) comenta que para indicar uma correspondência consistente o índice MAC deve ser maior que 0,90.

Na Tabela 5.6 estão apresentadas as frequências naturais obtidas experimentalmente e a variação de frequência FER.

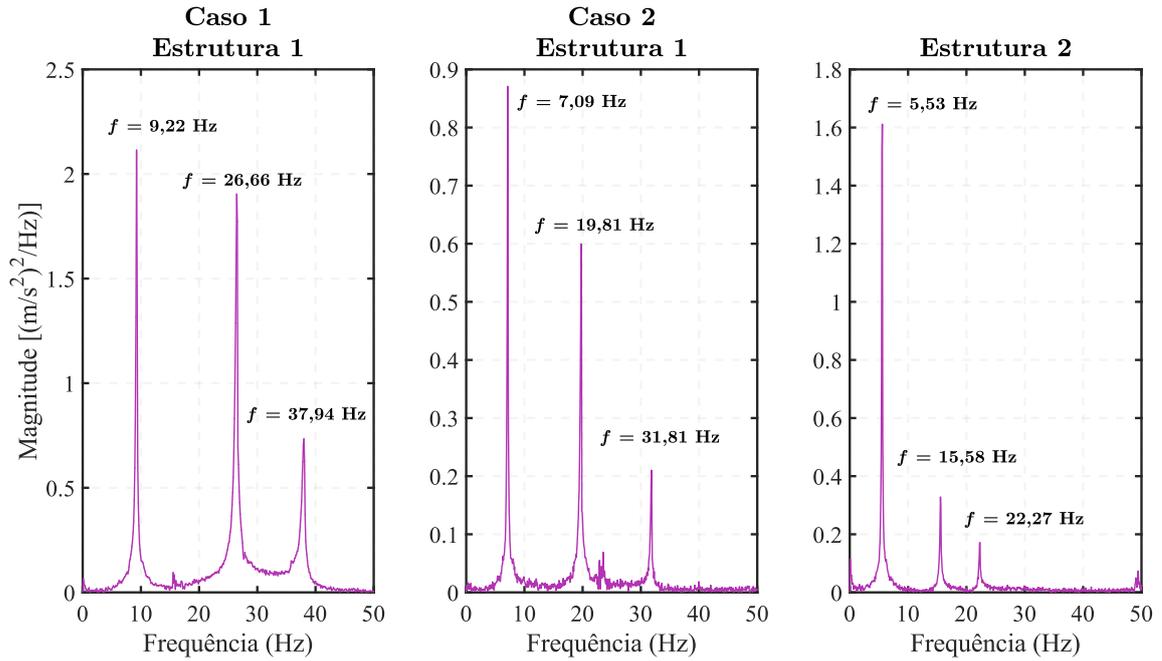
Tabela 5.6 – Frequências experimentais e valores de FER.

Estrutura	Modo	Frequência (Hz)			FER (%)		
		1	2	3	1	2	3
1	Caso 1	9,22	26,66	37,94	0,11	5,74	9,11
	Num.	9,21	25,13	34,48			
	Caso 2	7,09	19,81	31,81	0,42	4,24	6,85
	Num.	7,06	18,97	29,63			
2		5,53	15,58	22,27	0,72	0,26	2,83
	Num.	5,57	15,54	21,64			

Fonte: Dados da pesquisa.

Observa-se que em relação ao primeiro modo, o valor de FER foi no máximo 0,72 %. Para os modos 2 e 3, verifica-se um valor FER de até 9,11 %. Isso ocorre em razão de possíveis problemas construtivos nos modelos e erros nos instrumentos de medição. Na Figura 5.12 estão ilustrados os espectros de frequência dos registros obtidos.

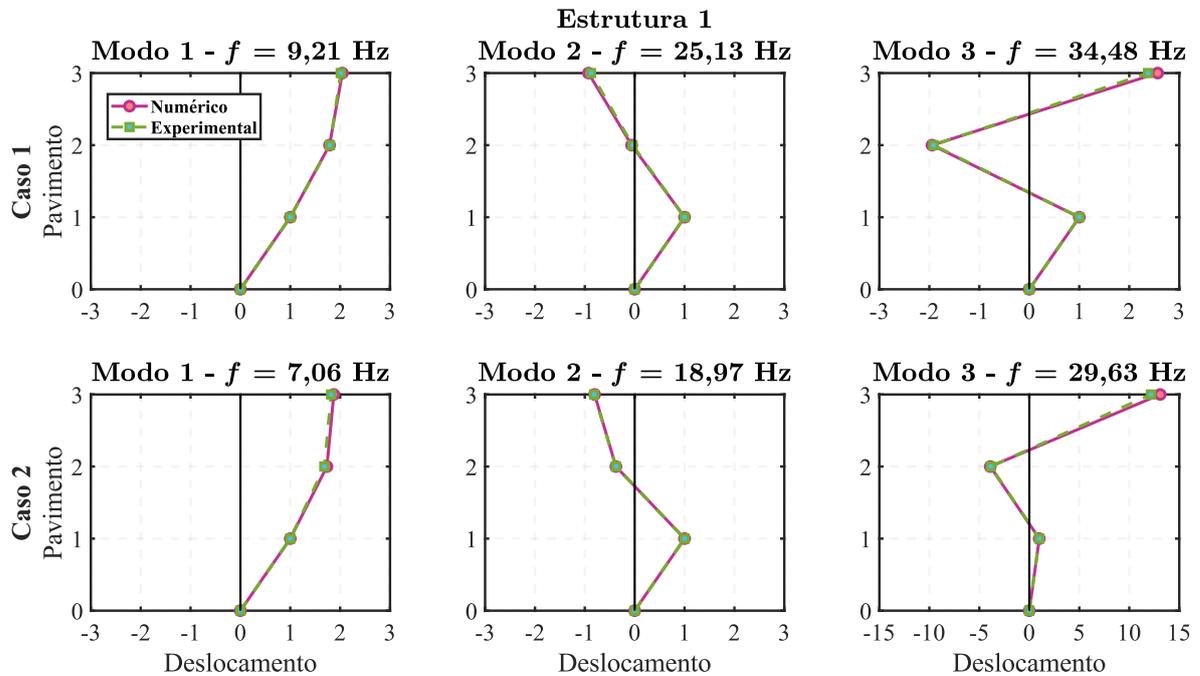
Figura 5.12 – Espectro de frequências.



Fonte: Dados da pesquisa.

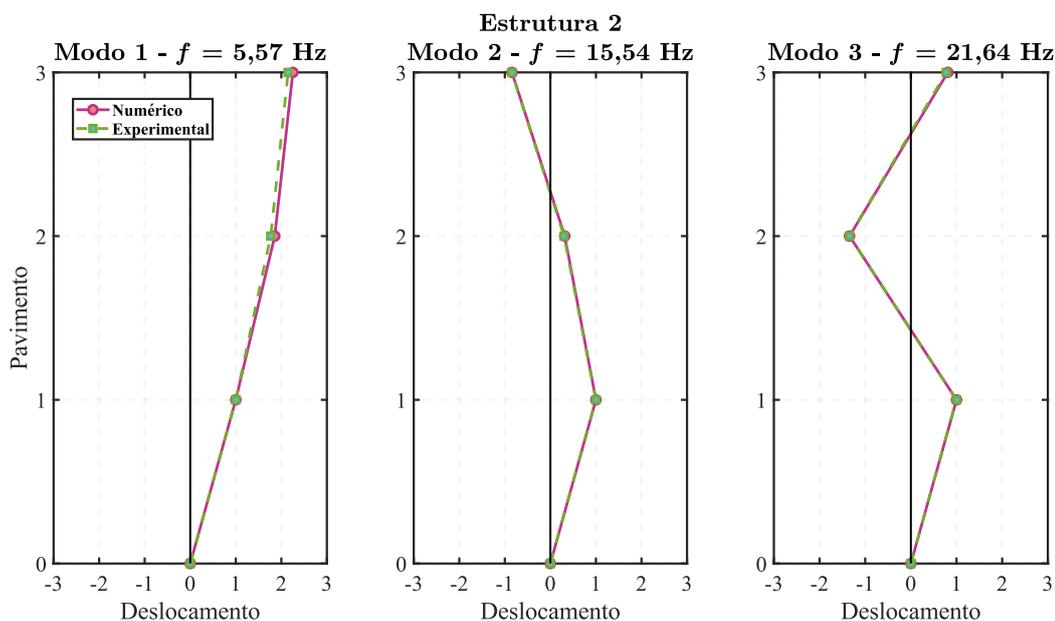
Nas Figura 5.13 e Figura 5.14 são apresentados a comparação entre os modos de vibração obtidos experimentalmente e numericamente para as Estruturas 1 e 2, respectivamente.

Figura 5.13 – Comparação entre os modos de vibração da Estrutura 1.



Fonte: Dados da pesquisa.

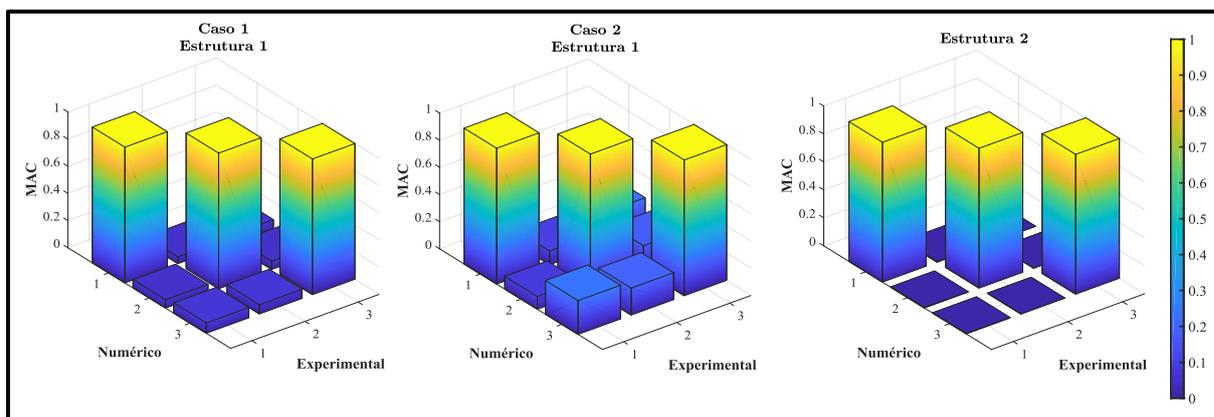
Figura 5.14 – Comparação entre os modos de vibração da Estrutura 2.



Fonte: Dados da pesquisa.

Conforme apresentado nas figuras acima, a comparação dos modos numéricos e experimentais estão indicando uma boa correspondência. Na Figura 5.15 estão apresentados os gráficos do índice MAC.

Figura 5.15 – Índice MAC das duas estruturas.



Fonte: Dados da pesquisa.

Com o índice MAC é possível confirmar que os modelos numéricos e experimentais têm uma correlação satisfatória. Também, em razão da frequência fundamental (Modo 1) das estruturas apresentarem diferenças menores que 1 % entre os modelos numérico e experimental, decidiu-se que os modelos numéricos são adequados, não sendo necessária a atualização do

modelo. Por fim, são apresentados na Tabela 5.7 as razões de amortecimento (ζ) para cada estrutura e modo obtidas pelo *software* ARTeMIS Modal[®].

Tabela 5.7 – Razões de amortecimento das estruturas.

Estrutura	Modo	ζ (%)		
		1	2	3
1	Caso 1	0,65	0,33	0,30
	Caso 2	1,73	0,33	0,21
2		1,02	0,42	0,33

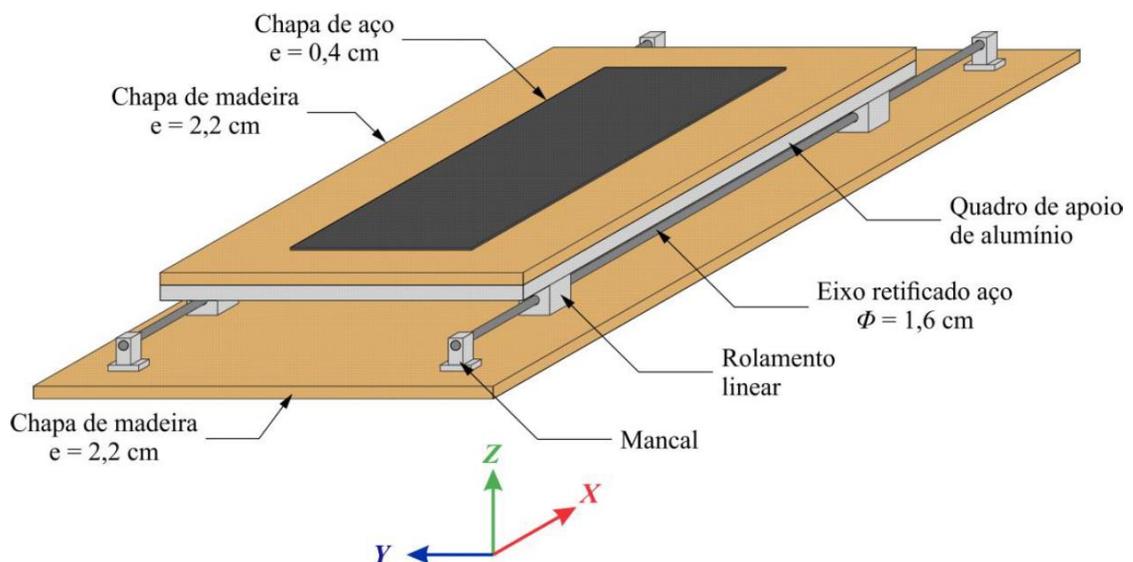
Fonte: Dados da pesquisa.

O acréscimo das massas na Estrutura 1 (Caso 2) elevou a razão de amortecimento do primeiro modo. Na Estrutura 2, também se verifica uma razão de amortecimento maior que a Estrutura 1 (Caso 1), em virtude das massas adicionais no modelo.

5.3 MESA DE VIBRAÇÃO

A mesa de vibração foi desenvolvida por Peña (2017) com objetivo de simular movimentos oscilatórios (de maneira unidirecional) nos modelos estruturais. Na Figura 5.16 está ilustrado um desenho tridimensional da mesa.

Figura 5.16 – Desenho da mesa de vibração.



Fonte: (Peña, 2017).

O movimento da mesa é gerado através de um sistema de biela–manivela, que transforma o movimento circular em um movimento de translação. O movimento circular é gerado por um motor (Voges trifásico Linha VTop) de 2,0 CV, com quatro polos e frequência de rotação de 0 a 60 Hz. Para controlar a velocidade de rotação ω do motor é utilizado um inversor de frequência com auxílio de um potenciômetro M22 Eaton. Uma foto da mesa de vibração montada pode ser visualizada na Figura 5.17.

Figura 5.17 – Mesa de vibração para os estudos experimentais.



Fonte: Autoria própria.

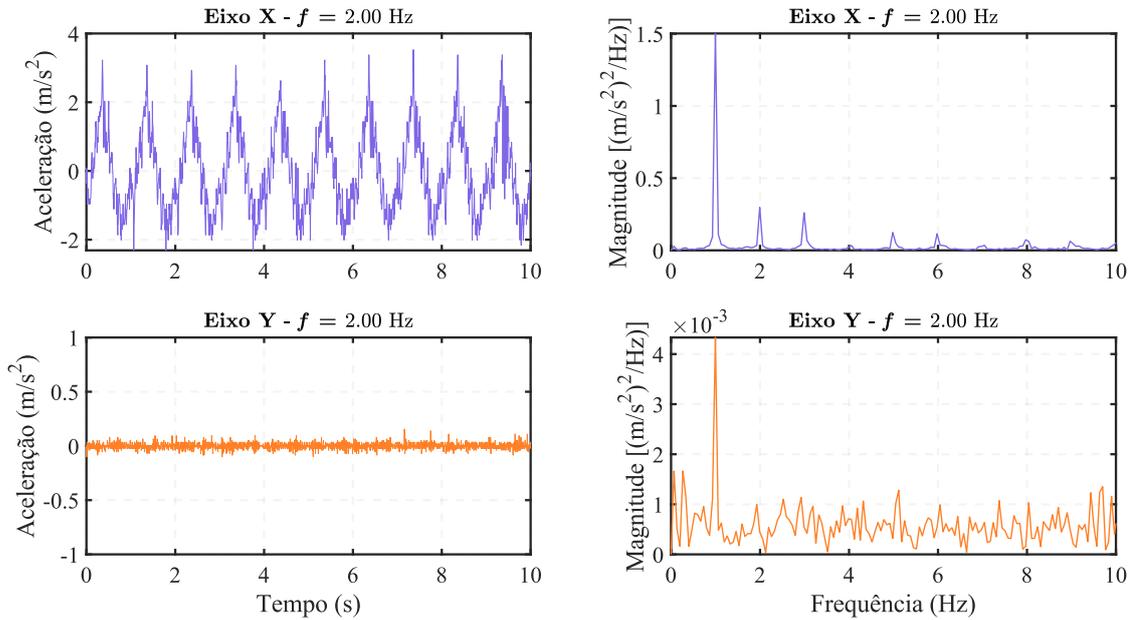
A mesa foi fixada sobre 4 blocos de concreto através de parafusos, arruelas e porcas. Para garantir que ela estava no prumo, foi empregado um nível e realizado diversos testes para verificar possíveis ruídos e desaprumos.

5.3.1 Verificação da mesa de vibração

Essa verificação tem como finalidade avaliar se o ruído presente na direção Y da mesa é significativo o suficiente para interferir nos ensaios. Foi aplicada uma amplitude de 4 cm (pela manivela), o mesmo valor utilizado nos ensaios com os modelos estruturais. Um acelerômetro foi colocado na direção X da mesa e outro na direção Y. Foram realizados 5 ensaios para cada frequência entre 2,0 e 4,5 Hz, com intervalo de 0,50 Hz. A média dos resultados é utilizada para reduzir as incertezas dos dados coletados.

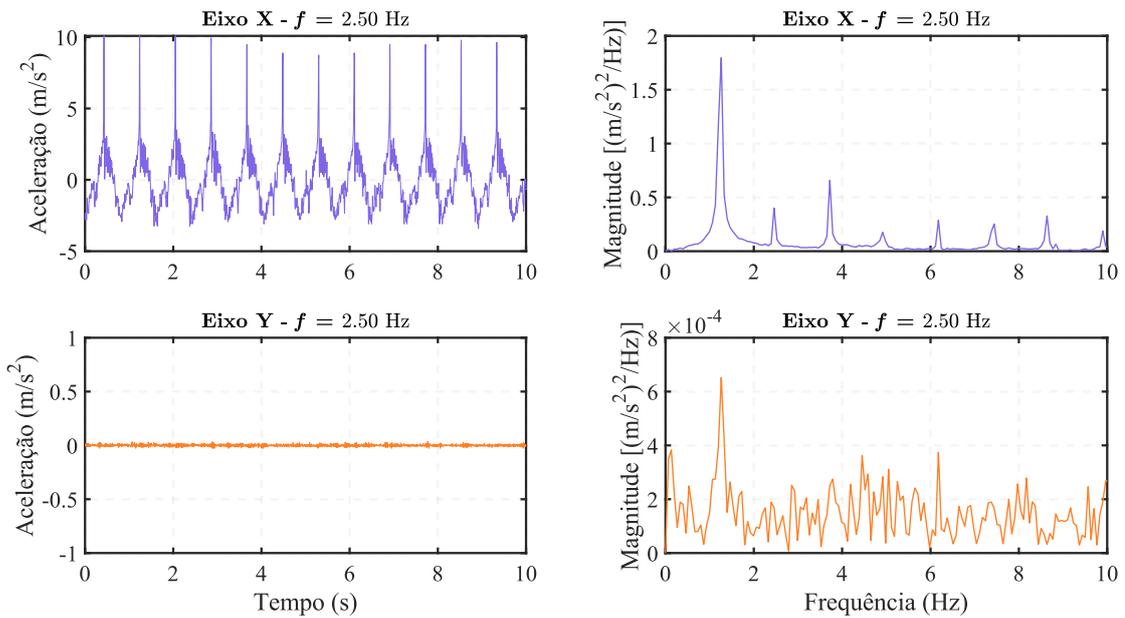
Entre as Figura 5.18 e Figura 5.23 estão apresentados os registros de aceleração e os espectros de frequência nas duas direções direção (X e Y) para cada frequência analisada.

Figura 5.18 – Histórico de acelerações e espectro de frequências – Motor a 2,0 Hz.



Fonte: Dados da pesquisa.

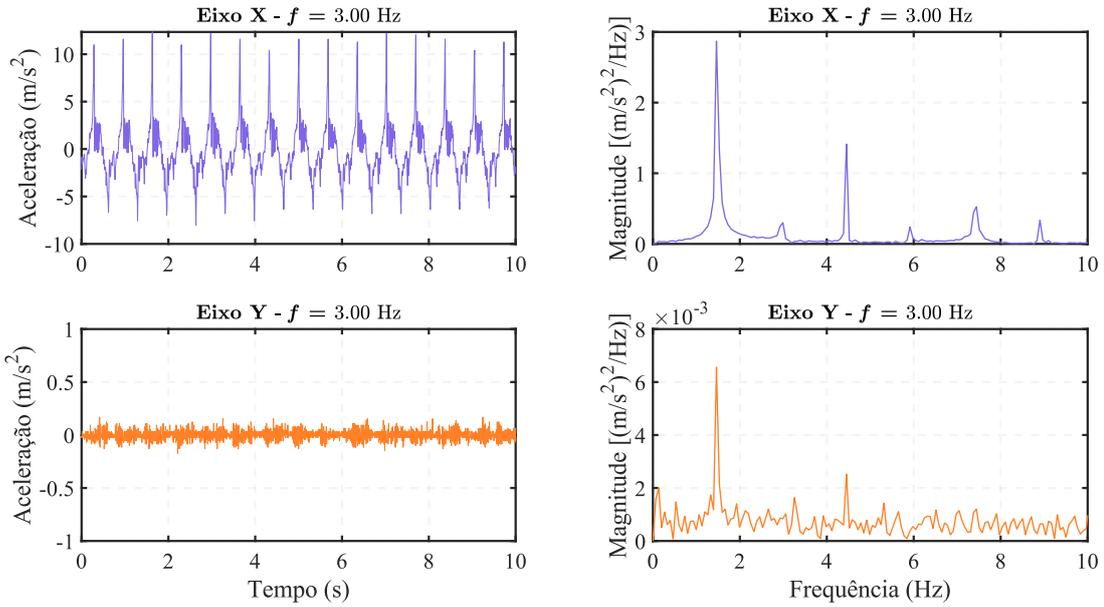
Figura 5.19 – Histórico de acelerações e espectro de frequências – Motor a 2,5 Hz.



Fonte: Dados da pesquisa.

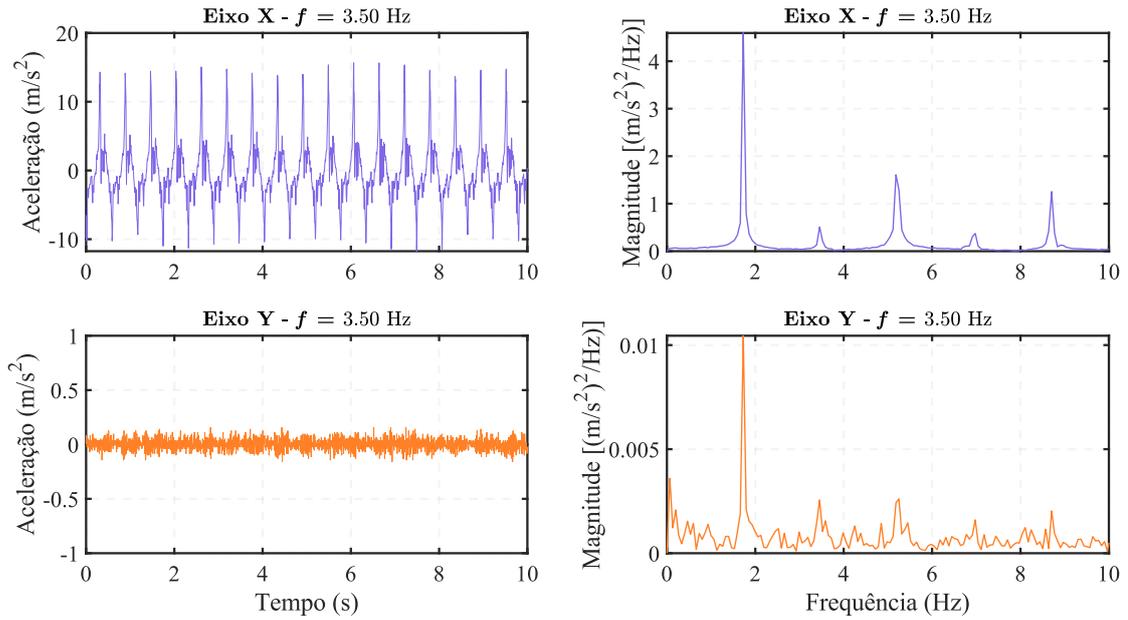
Pode-se reparar nos gráficos que as acelerações no eixo Y são pequenas em relação ao eixo de movimento X. Também, observa-se que as amplitudes do eixo Y são bem inferiores ao eixo X, na ordem de 0,50 % apenas. Nessas circunstâncias, infere-se que as vibrações na direção Y não interfere de forma significativa os ensaios.

Figura 5.20 – Histórico de acelerações e espectro de frequências – Motor a 3,0 Hz.



Fonte: Dados da pesquisa.

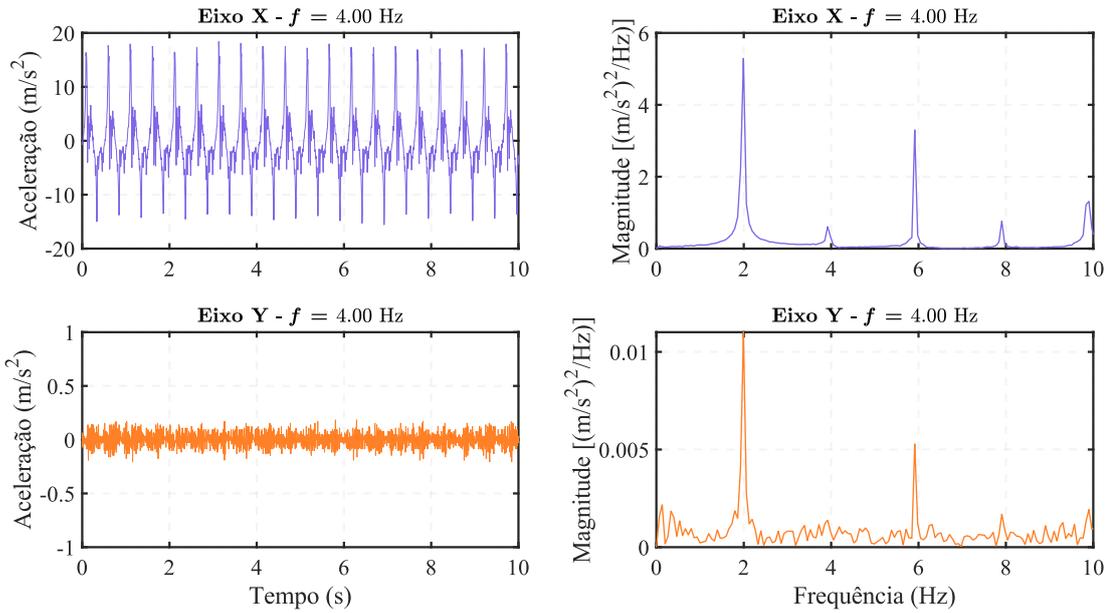
Figura 5.21 – Histórico de acelerações e espectro de frequências – Motor a 3,5 Hz.



Fonte: Dados da pesquisa.

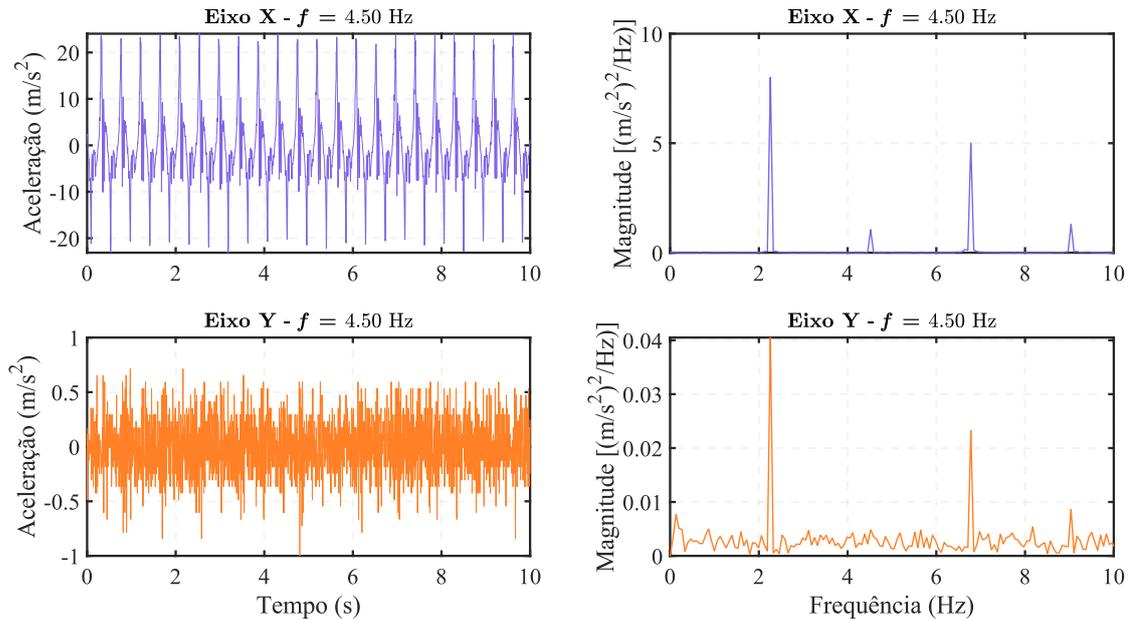
É importante destacar que em razão do movimento circular uniforme do sistema, a frequência se divide em duas partes iguais nas direções ortogonais. Nos espectros de frequência é possível observar esse comportamento.

Figura 5.22 – Histórico de acelerações e espectro de frequências – Motor a 4,0 Hz.



Fonte: Dados da pesquisa.

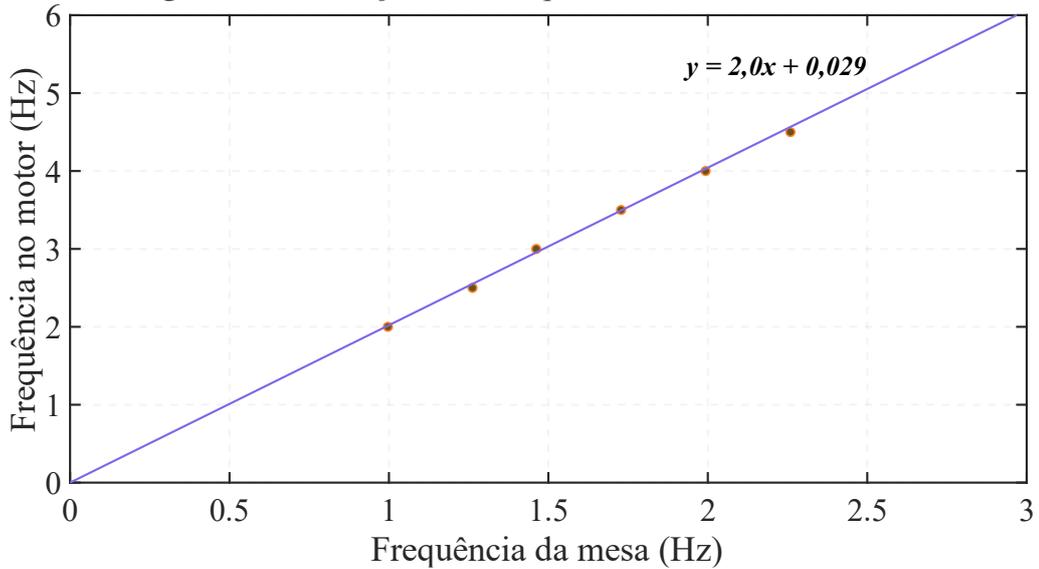
Figura 5.23 – Histórico de acelerações e espectro de frequências – Motor a 4,5 Hz.



Fonte: Dados da pesquisa.

Na Figura 5.24 estão apresentadas as frequências aplicadas no motor em relação a frequência medida na mesa.

Figura 5.24 – Relação entre frequência do motor e da mesa.



Fonte: Dados da pesquisa.

Através do gráfico pode-se concluir que a frequência medida na mesa é aproximadamente metade da frequência do motor.

5.4 DETERMINAÇÃO DA INERTÂNCIA ÓTIMA DO DISPOSITIVO *INERTER*

Nessa seção são identificados os valores da inertância (b) do dispositivo *inertex* que conecta as duas estruturas. A inertância é determinada para os dois casos apresentados na Figura 5.6. É utilizado o método de otimização enxame de partículas (PSO) com a função objetivo baseada nos deslocamentos máximos relativos entre os pavimentos (Δ), apresentada no Capítulo 3:

$$f_{obj1} = \max\{\max(\{\Delta\}^1)^2 \quad \max(\{\Delta\}^2)^2\} \quad (5.11)$$

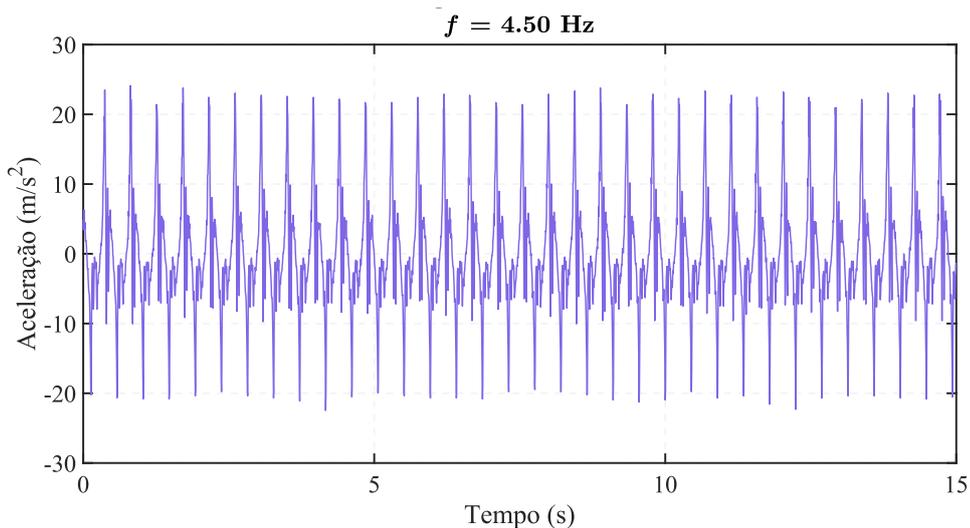
$$f_{obj2} = \sum_{i=1}^3 (\{\Delta\}_i^1)^2 + \sum_{i=1}^3 (\{\Delta\}_i^2)^2 \quad (5.12)$$

A função objetivo, que será minimizada, é a soma das equações f_{obj1} e f_{obj2} . Essa função foi escolhida em razão da análise numérica e por já ter sido aplicada em estudos anteriores realizados pelo grupo de pesquisa. Assim, é possível obter um valor de inertância que conduz a um dispositivo eficiente no controle das vibrações excessivas. Como já citado, o dispositivo é alocado no terceiro pavimento da Estrutura 2.

Como movimento de base é aplicada a frequência de 4,50 Hz no motor e amplitude 4 cm na manivela. Com isso, a frequência que chega na base das estruturas é de aproximadamente 2,259 Hz.

O valor que é empregado no motor tem sua escolha baseado nos estudos de Madhamshetty e Manimala (2018). Nesse estudo, realizaram a caracterização de um dispositivo *inertor rack-and-pinion* sob ação de baixas frequências (<5Hz). Os resultados indicaram que em baixas frequências a rigidez e o amortecimento internos do dispositivo têm uma influência significativa sobre nele. Para tentar reduzir esses efeitos a maior frequência segura no motor, para não causar danos à mesa e aos modelos, foi definida em 4,50 Hz. Medições com o acelerômetro na base das estruturas com frequência de entrada resultaram no registro de acelerações apresentado na Figura 5.25, com espaço de tempo de 0,005 s.

Figura 5.25 – Acelerações de entrada para todos os ensaios.



Fonte: Dados da pesquisa.

Os resultados da otimização estão apresentados na Tabela 5.8, assim como a redução da aceleração máxima em cada estrutura (Pavimento 3).

Tabela 5.8 – Inertância ótima determinada para os casos experimentais estudados.

Caso	b (kg)	Redução do <i>rms</i> da aceleração 3° pav. (%)	
1	0,125	Estrutura 1	52,0
		Estrutura 2	49,0
2	0,620	Estrutura 1	48,0
		Estrutura 2	34,0

Fonte: Dados da pesquisa.

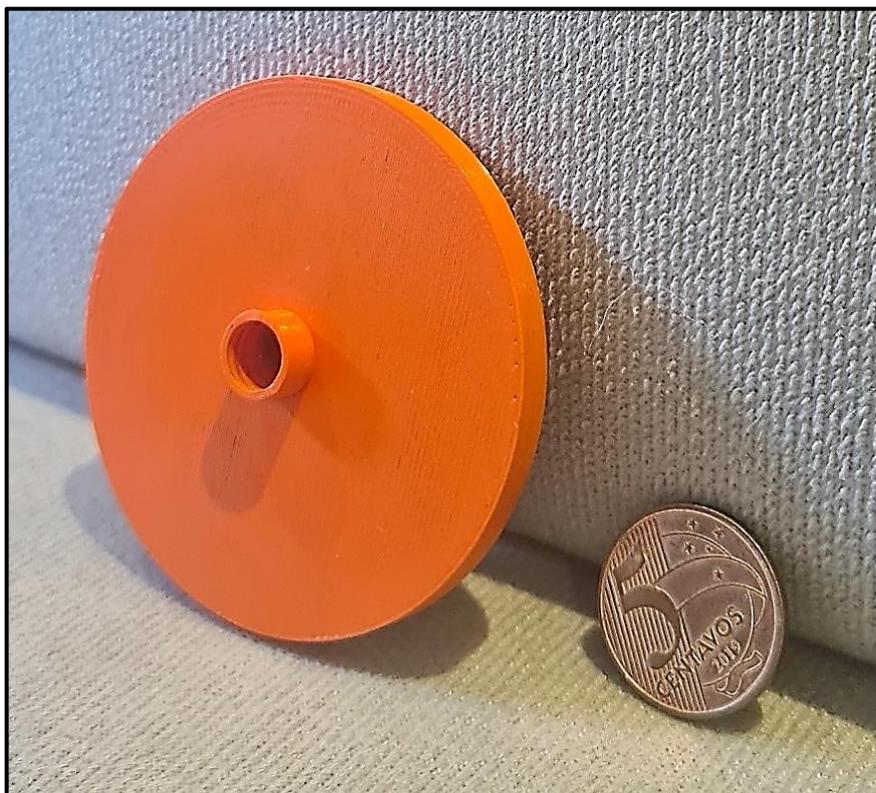
Com os valores das inertâncias pode-se estimar o raio e a massa necessários no volante que será acoplado no dispositivo *inertex*. Para isso, será aplicada a Eq. (5.2) que considera as características inerciais dos componentes. Adicionando os valores conhecidos à equação, e considerando que o volante tem a forma de um cilindro, tem-se:

$$b = \left[\frac{\left(\frac{6 \cdot 10,5^2}{2} + m_v \cdot (r_v/\sqrt{2})^2 \right) \cdot 42^2}{10^2 \cdot 10,5^2} + \frac{(2 \cdot 10^2 + 32 \cdot 42^2)}{2 \cdot 10^2} + 20 \right] \quad (5.13)$$

$$b = [356,16 + 0,08 \cdot m_v \cdot r_v^2]$$

Através da equação acima constata-se que o dispositivo *inertex* desenvolvido tem uma inertância de pelo menos **356 g**. Dessa forma, para o Caso 1, foi construído na impressora 3D um volante de raio 3,25 cm e peso total de **11 g**, conforme Figura 5.26. Como a inertância requerida é menor que a do próprio dispositivo, a finalidade principal foi observar o comportamento e o movimento do volante durante o ensaio.

Figura 5.26 – Volante 1 para o Caso 1.

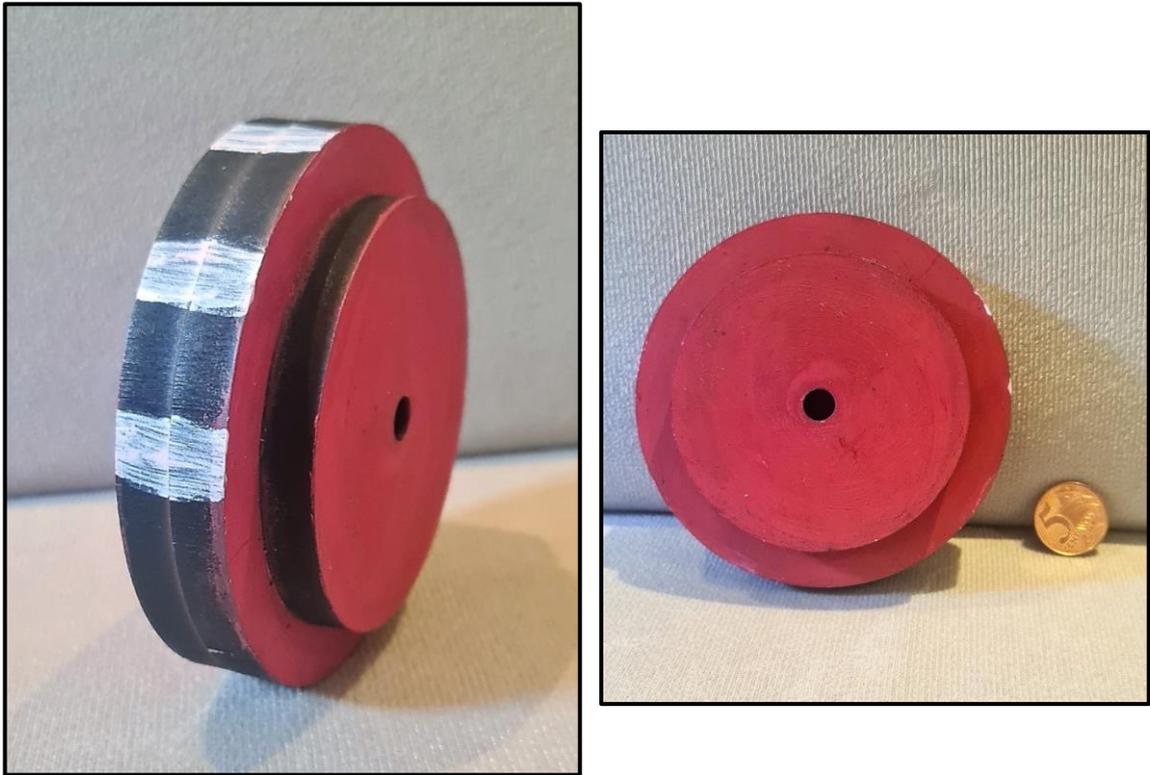


Fonte: Autoria própria

No Caso 2, uma vez que a inertância necessária é maior, é preciso um volante com massa e dimensões calculadas. Para isso, depois de cálculos prévios, foram cortados em uma

impressora a laser dois círculos em MDF com raio 5 cm e um com raio 3,8 cm. Os círculos são colados com cola específica para madeira, conforme apresentado na Figura 5.27. Nessa configuração, o volante 2 possui massa de **137 g**.

Figura 5.27 – Volante 2 para o Caso 2.



Fonte: Autoria própria.

Por fim, o valor real de inércia aplicado em cada caso são descritos na Tabela 5.9.

Tabela 5.9 – Inércia teórica e real da análise experimental.

Caso	$b_{teórico}$ (kg)	b_{real} (kg)	Diferença (%)
1	0,125	0,356	192,8 %
2	0,620	0,602	3 %

Fonte: Dados da pesquisa.

Os dois casos serão simulados experimentalmente sem o volante e com o volante acoplado no dispositivo *inertor*, com objetivo de comparar o comportamento dinâmico do sistema e a influência do volante.

5.5 RESPOSTAS DINÂMICAS DOS MODELOS ESTRUTURAIS

A frequência de 4,50 Hz (no motor) é aplicada para obtenção das acelerações das estruturas. São realizados 15 ensaios para cada caso, sendo 5 para o sistema desacoplado, 5 para o sistema acoplado sem o volante e 5 para o sistema acoplado com o volante. Deste modo, o resultado apresentado é uma média dos valores obtidos nos 5 ensaios.

Em primeiro momento, para cada caso, as duas estruturas são parafusadas na mesa de vibração. Um acelerômetro é colocado no terceiro pavimento de cada estrutura e são realizados os ensaios. Em seguida, o sistema é acoplado através do dispositivo *inertor*. Sem a adição do volante, são executados novos ensaios. Por fim, o volante é acoplado ao *inertor* para os últimos ensaios.

5.5.1 Caso 1

Na Figura 5.28 é apresentado o sistema montado para os ensaios do Caso 1. As situações não acoplada e acoplada são ilustradas.

Figura 5.28 – Sistema montado para os ensaios – Caso 1.



a) Não Acoplado



b) Acoplado

Fonte: Autoria própria.

Os registros de acelerações das duas estruturas para o sistema não acoplado, acoplado sem volante e acoplado (com volante) estão ilustrados na Figura 5.29. Na Tabela 5.10 é apresentada a resposta *rms* para cada situação. Os valores entre parênteses representam a porcentagem de redução em relação ao sistema não acoplado (valores negativos significam aumento da resposta).

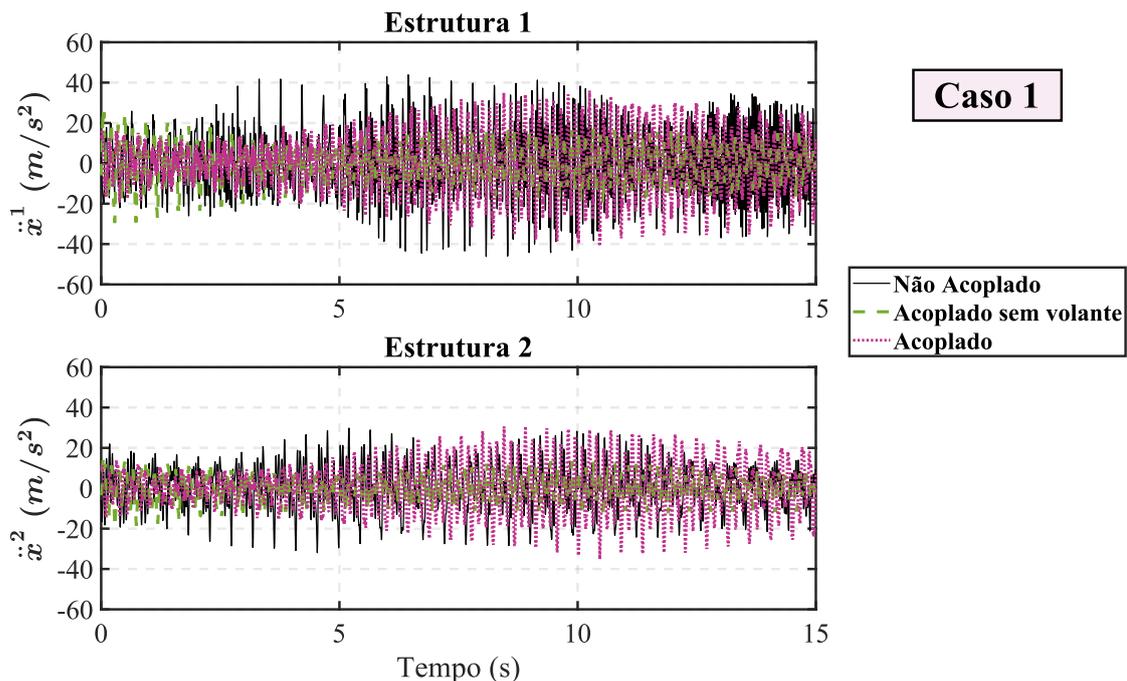
Tabela 5.10 – Respostas *rms* experimentais – Caso 1.

Estrutura	<i>rms</i> aceleração		
	Não acoplado	Acoplado Sem volante	Acoplado
1	16,43	8,58 (48 %)	14,77 (10 %)
2	10,67	5,81 (46 %)	12,10 (-13 %)

Fonte: Dados da pesquisa.

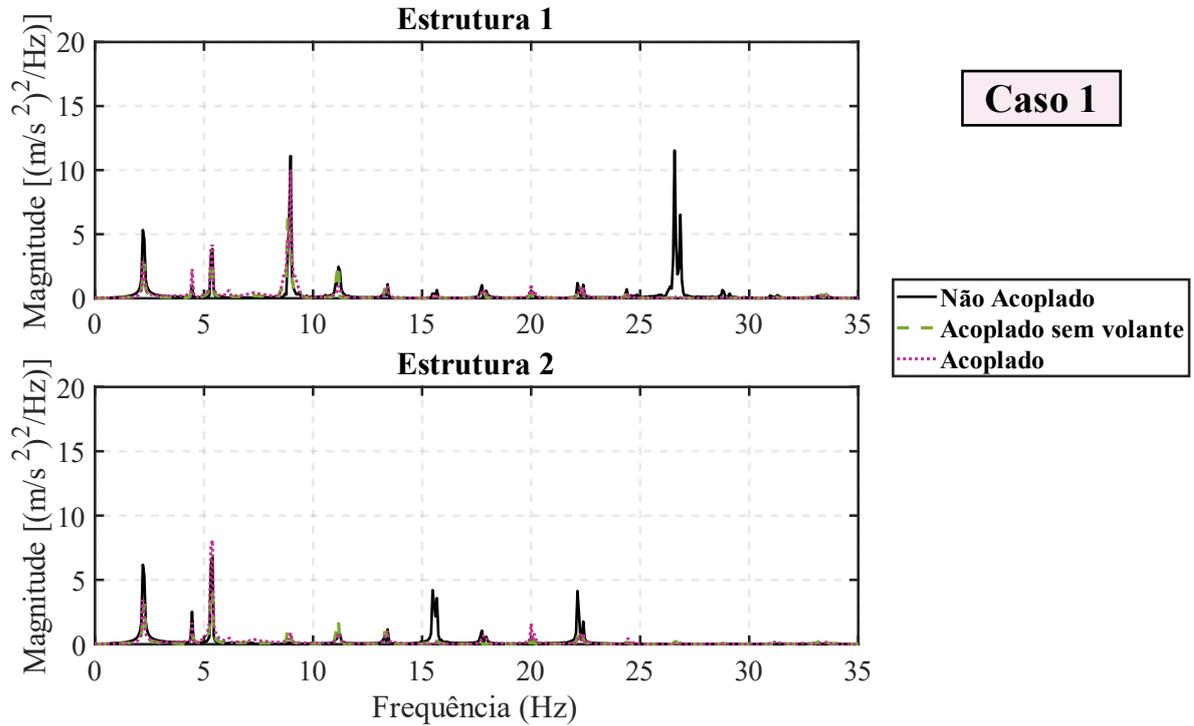
Observa-se nas acelerações medidas que o dispositivo *inertor* é eficiente no controle das vibrações. Em razão da inertância do dispositivo destoar do valor ótimo determinado, as acelerações obtidas na Estrutura 2 (sistema acoplado com o volante) são maiores que para o sistema sem controle. Essa diferença pode estar atrelada ao amortecimento e rigidez internos do próprio dispositivo em virtude da baixa frequência de excitação. O espectro de resposta está apresentado na Figura 5.30.

Figura 5.29 – Respostas de acelerações do Caso 1.



Fonte: Dados da pesquisa.

Figura 5.30 – Espectro de resposta do Caso 1.



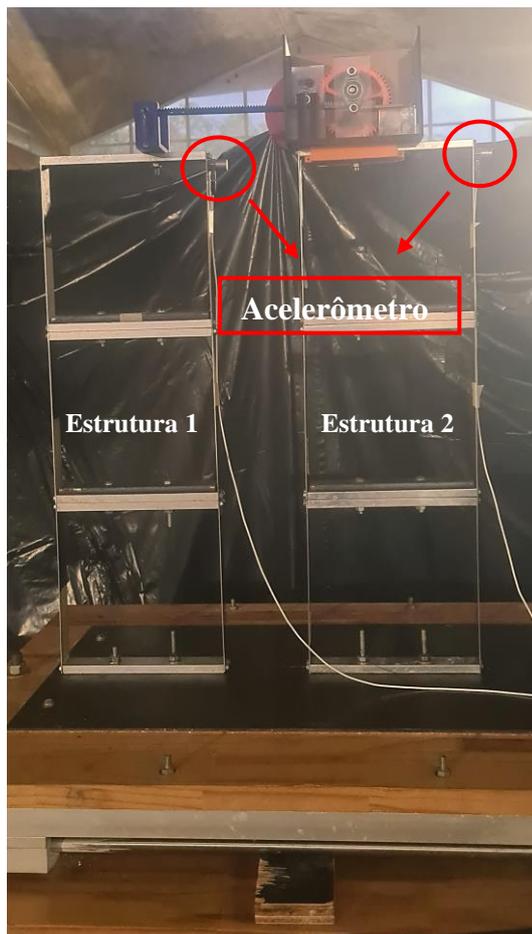
Fonte: Dados da pesquisa.

Como o *inerte* é um dispositivo do tipo inercial, as frequências naturais do sistema conectado são modificadas. Além disso, as frequências da mesa de vibração também aparecem no espectro. Todavia, observa-se reduções nos picos de frequência para o sistema acoplado, principalmente, sem o volante. Na Estrutura 1 é possível notar uma atenuação significativa da magnitude do sinal em torno de sua frequência fundamental (9,22 Hz).

5.5.2 Caso 2

O sistema acoplado, pronto para ensaio, está apresentado na Figura 5.31.

Figura 5.31 – Sistema montado para os ensaios – Caso 2.



Fonte: Autoria própria.

As respostas de aceleração em relação ao tempo para o Caso 2 são ilustradas na Figura 5.32. Para cada situação de sistema: não acoplado, acoplado sem volante e acoplado (com volante), as respostas *rms* estão apresentadas na Tabela 5.11.

Tabela 5.11 – Respostas *rms* experimentais – Caso 2.

Estrutura	<i>rms</i> aceleração		
	Não acoplado	Acoplado Sem volante	Acoplado
1	22,85	14,65 (36 %)	9,44 (59 %)
2	11,84	10,89 (8 %)	9,80 (17 %)

Fonte: Dados da pesquisa.

Assim como no Caso 1, valores entre parênteses representam a porcentagem de redução em relação ao sistema não acoplado. Por fim, o espectro de frequências do Caso 2 é evidenciado na Figura 5.33.

Figura 5.32 – Respostas de acelerações do Caso 2.

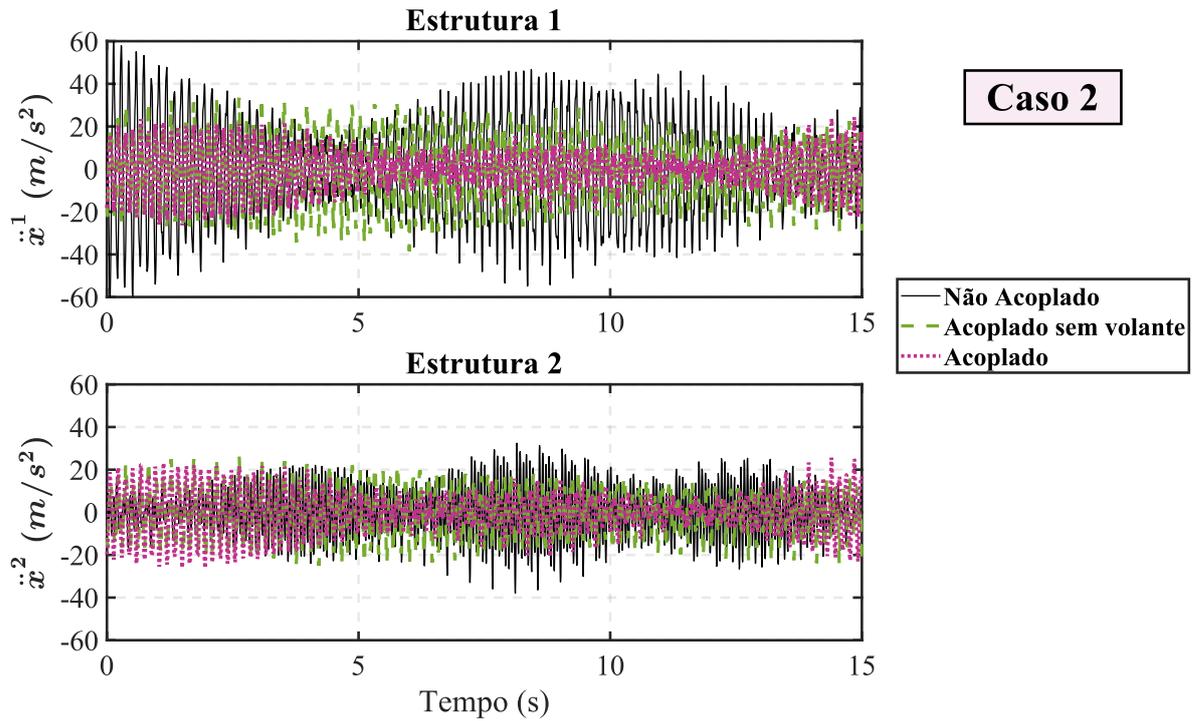
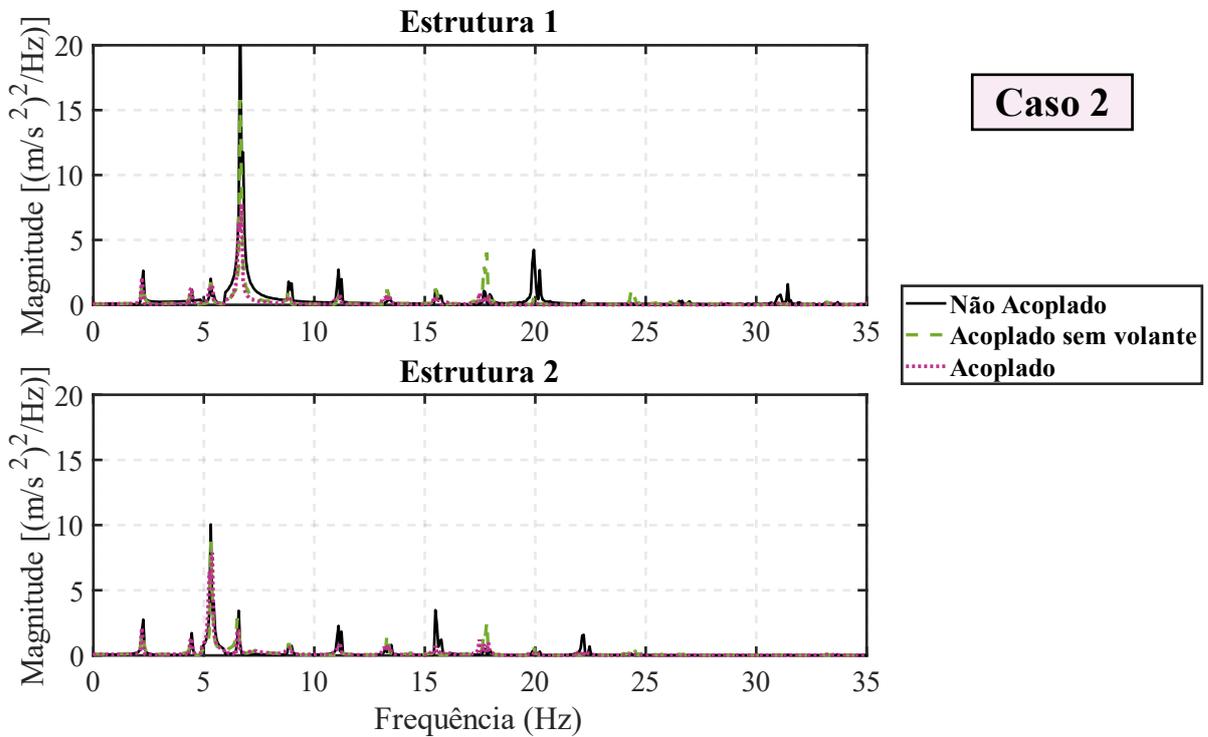


Figura 5.33 – Espectro de resposta do Caso 2.



Fonte: Dados da pesquisa.

No Caso 2, o dispositivo *inertor* demonstrou-se bastante eficiente. Em ambas as estruturas, quando se vincula o volante ao *inertor*, a redução das respostas dinâmicas é

intensificada. Esse comportamento era esperado uma vez que a inércia teórica e real tinham uma diferença de apenas 3 %. No espectro de frequências, também há modificações nas frequências do sistema e reduções visíveis nos picos.

Outro ponto importante, que se observa nos dois casos, é que a conexão através do dispositivo *inertor* apresenta uma rigidez, em razão dos picos oriundos da estrutura adjacente que surgem nos sinais de cada estrutura. Essa rigidez, interna do *inertor*, foi estudada por Madhamshetty e Manimala (2018).

De forma geral, a análise experimental confirma que o dispositivo baseado em *inertor*, como elemento de conexão, é uma alternativa favorável no controle das vibrações em edificações acopladas.

6 CONCLUSÕES

Neste trabalho foram realizados estudos numéricos e experimentais sobre a técnica de edificações adjacentes utilizando dispositivos de controle baseados em *inertor* (DBI) como elemento de conexão. Na análise numérica, investigou-se a técnica de acoplamento estrutural em dois casos de edificações com múltiplos graus de liberdade acopladas com amortecedor viscoelástico (VD), amortecedor viscoelástico com elemento *inertor* (VDI), amortecedor *inertor* sintonizado (AIS) e amortecedor *inertor* de massa sintonizado (AIMS). Para esse estudo, são aplicadas três funções objetivo: uma baseada no deslocamento relativo entre pavimentos; uma fundamentada na energia total do sistema; e uma considerando as acelerações absolutas. No estudo experimental o objetivo foi desenvolver e analisar o desempenho de um dispositivo *inertor* na técnica de acoplamento estrutural. São realizados ensaios em estruturas *shear frame* adjacentes acopladas através de um DBI do tipo *rack-and-pinion*, desenvolvido durante a pesquisa, e submetidas as acelerações na base produzidas por mesa de vibração.

• *Conclusões das análises numéricas*

Os edifícios utilizados no estudo numérico foram modelados como sistemas de múltiplos graus de liberdade, do tipo *shear frame*. Foram estudados dois casos: Caso 1 – com um edifício de 3 pavimentos adjacente com um edifício de 1 pavimento e Caso 2 – um edifício de 8 pavimentos adjacente com um edifício de 4 pavimentos.

A análise numérica demonstrou que o uso de DBI é uma boa alternativa para utilização na técnica de acoplamento estrutural. De forma geral, há uma tendência desses dispositivos apresentarem propriedades mecânicas menores, quando comparados ao dispositivo VD, e de possuírem um desempenho superior para o controle das vibrações excessivas.

O método de otimização e as três funções objetivo foram eficientes para determinarem as características ótimas para o controle de edificações adjacentes. Porém, algumas particularidades foram encontradas em cada caso estudado.

No Caso 1 (numérico), o comportamento da técnica de acoplamento estrutural utilizando DBI foi condizente com os estudos realizados por Song *et al.* (2021). A Estrutura 1, mais flexível, apresentou reduções nas respostas dinâmicas absolutas consideráveis quando o sistema acoplado era submetido aos sismos de El Centro e Kobe, alcançando atenuações na

ordem de 60 %. Já na Estrutura 2, observou-se uma ampliação das respostas absolutas e resposta *rms* do deslocamento.

Para a situação de um edifício com pouca flexibilidade é sugerida uma otimização baseada na energia ou na aceleração absoluta. Essa afirmação é dada em razão da menor diferença entre as acelerações máximas absolutas das estruturas em comparação com as diferenças observadas nos deslocamentos e velocidades. Assim, em virtude da utilização do algoritmo PSO, há uma tendência maior da análise de otimização encontrar mais equilíbrio na estratégia baseada em aceleração. Também, as equações para determinar a energia do sistema consideram os deslocamentos, velocidades, massas e rigidezes de cada estrutura, deste modo, espera-se uma equivalência superior no controle das vibrações.

O amortecedor viscofluido ou amortecedor viscofluido com *inerters* foram as melhores opções para o objetivo de reduzir os deslocamentos da Estrutura 1 simultaneamente com os deslocamentos da Estrutura 2.

O sistema acoplado submetido às acelerações providas pelo sismo de Northridge leva outra observação importante no Caso 1. O conteúdo de frequências desse sismo é mais significativo para a Estrutura 2. Dessa maneira, as reduções das respostas dinâmicas são mais expressivas para essa estrutura. Ou seja, o conteúdo de frequências da excitação apresenta uma parte importante no desempenho da técnica de acoplamento estrutural.

No Caso 2 (8 pav. – 4 pav.), o estudo de otimização revelou a necessidade de dois dispositivos para o controle dos edifícios adjacentes, quando se considera o dispositivo VD na conexão. Já quando se aplica uma estratégia de otimização baseada nas acelerações, foi determinado o uso de apenas um dispositivo VD. Pode-se notar que o uso de DBI oferece uma melhora no desempenho da técnica de acoplamento estrutural, principalmente para a estrutura mais flexível.

O comportamento das atenuações das respostas dinâmicas do Caso 2 deixa evidente a afirmação realizada no Caso 1. A Estrutura 2 possui uma maior rigidez, porém, em razão do conteúdo de frequências dos sismos de El Centro, Kobe e Northridge, os valores absolutos e *rms* de deslocamento, velocidade e aceleração resultaram maiores. Assim, o acoplamento estrutural mostrou-se mais eficaz para essa estrutura. No Caso 2 é mais indicado o uso de dispositivos AIS ou VD na conexão dos edifícios adjacentes.

Pode-se afirmar que a técnica de acoplamento estrutural apresenta melhor desempenho no edifício que é mais afetado pela solicitação externa. Também, os DBI aumentam a

performance de controle para a estrutura mais flexível, sem interferir de forma significativa na eficiência na estrutura com maior rigidez.

• *Conclusões do estudo experimental*

Em razão das características dos modelos estruturais utilizados na análise experimental, foi previsto que o dispositivo baseado em *inertor*, do tipo *rack-and-pinion*, apresentaria influência sobre as características dinâmicas da estrutura em que fosse alocado. O dispositivo foi construído em plástico, MDF, acrílico e aço e foi projetado para apresentar a menor massa possível. As engrenagens necessárias para esse DBI não podiam apresentar uma dimensão muito pequena, pois foram produzidas em impressora 3D e seu tamanho poderia interferir na qualidade de impressão. Também, não foram encontrados mancais com dimensões menores no mercado. Assim, o dispositivo foi construído para ser parte integrante da estrutura e sua massa final ficou em 0,478 g. O volante, por sua vez, foi conectado no momento da realização dos ensaios no sistema acoplado.

É constatado através de ensaios de vibração livre e aplicando a porcentagem de variação de frequência FER e o *Modal Assurance Criterion* (MAC), que os modelos estruturais *shear frame* apresentaram uma ótima correlação com os modelos numéricos. Diferenças de até 0,72 % são encontradas na primeira frequência. A máxima diferença determinada foi de 9,11 % para a terceira frequência na Estrutura 1 (Caso 1). Os modos de vibração são, também, suficientemente semelhantes. Dessa maneira, os modelos numéricos podem ser utilizados com segurança para representar os modelos estruturais reais.

As razões de amortecimento determinadas a partir do *software* ARTEMIS® modal são condizentes com as características das estruturas. Resultados semelhantes foram encontrados em Peña (2017).

Na mesa de vibração, observa-se um ruído na direção transversal ao movimento fundamental em que foi projetada. Porém, é averiguado que a amplitude desses ruídos não é significativa para interferir nas análises dos edifícios acoplados. A frequência de 4,5 Hz foi aplicada no motor para realização dos ensaios, resultando em uma frequência de 2,259 Hz na base das estruturas adjacentes.

A determinação do valor da inertância para o controle das vibrações é realizada a partir de otimização determinística com o algoritmo PSO. O valor resultante para o Caso 1 foi de

0,125 kg e para o Caso 2 de 0,620 kg. Como a frequência de excitação é baixa, foi aplicada a equação de Madhamshetty e Manimala (2018) para calcular as dimensões e massas dos volantes. Essa equação revelou que o DBI, por si só, já possui uma inertância de 0,356 kg, em virtude da excitação de 2,259 Hz. Dessa forma, a inertância utilizada para o Caso 1 foi 192,8 % maior que a determinada numericamente. No Caso 2, entretanto, foi apenas 3 % menor.

Os resultados obtidos na mesa de vibração com os edifícios acoplados, confirmam a eficiência do uso de DBI na técnica de acoplamento estrutural. Porém, é importante a aplicação de um dispositivo otimizado, caso contrário, poderá haver ampliação das respostas, como observado no Caso 1. São observadas, no Caso 2, atenuações de até 59 % da resposta *rms* de aceleração de topo na Estrutura 1. Nos espectros de resposta, é verificado que a ligação através do dispositivo construído possui uma rigidez interna. Isso, possivelmente, ocorre em razão do atrito das engrenagens e de movimentos desalinhados. Madhamshetty e Manimala (2018) previram essa característica, bem como um amortecimento interno.

Por fim, é importante destacar que o comportamento observado no estudo experimental é semelhante aos resultados da análise numérica. A estrutura com a maior amplitude de resposta apresenta maiores reduções das vibrações quando a técnica de controle por acoplamento estrutural é utilizada.

6.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Com base no trabalho e conclusões apresentadas, são sugeridos como trabalhos futuros:

- Investigar a influência das características do solo presentes no filtro de Kanai-Tajimi no desempenho da técnica de acoplamento estrutural com DBI;
- Estudar o acoplamento estrutural com DBI aplicando os efeitos da iteração solo-estrutural;
- Analisar mais casos de edificações adjacentes com diferentes características dinâmicas;
- Utilizar modelos de edifícios com elementos de pórtico 2D e 3D;
- Aplicar diferentes dispositivos baseados em *inerters*;
- Realizar a caracterização experimental do dispositivo *inerters*;
- Estudar experimentalmente a técnica de acoplamento estrutural com DBI em modelos estruturais com massa maior, em que o peso do dispositivo não influencie significativamente no comportamento dinâmico da estrutura.

REFERÊNCIAS

ABDEDDAIM, M.; DJEDOUI, S.; OUNIS, A.; DJEDOUI, N. Double tuned mass damper inerter for seismic response reduction of structures. *In: XI International Conference on Structural Dynamics*, 2020, Athens, Greece. EASD procedia, p. 12. DOI: 10.47964/1120.9116.19264.

ABDEL RAHEEM, S. E. Mitigation measures for earthquake induced pounding effects on seismic performance of adjacent buildings. **Bulletin of Earthquake Engineering**, 12, n. 4, p. 1705-1724, 2014/08/01 2014.

ABDULLAH, M. M.; HANIF, J. H.; RICHARDSON, A.; SOBANJO, J. Use of a shared tuned mass damper (STMD) to reduce vibration and pounding in adjacent structures. **Earthquake Engineering & Structural Dynamics**, 30, n. 8, p. 1185-1201, 2001.

ABED, D.; AL THAWABTEH, J.; ALZUBI, Y.; ASSBEIHAT, J.; AL-SAHAWNEH, E. Influence of Earthquake Parameters on the Bi-directional Behavior of Base Isolation Systems. **Civil Engineering Journal-Tehran**, 8, n. 10, p. 2038-2052, Oct 2022.

AFSHAR, K. K.; KORZENIOWSKI, R.; KONIECZNY, J. Evaluation of Ride Performance of Active Inerter-Based Vehicle Suspension System with Parameter Uncertainties and Input Constraint via Robust H-8 Control. **Energies**, 16, n. 10, May 2023.

AGHLARA, R.; TAHIR, M. M. A passive metallic damper with replaceable steel bar components for earthquake protection of structures. **Engineering Structures**, 159, p. 185-197, 2018/03/15/ 2018.

AL-FAHDAWI, O. A. S.; BARROSO, L. R.; SOARES, R. W. Semi-active adaptive control for enhancing the seismic performance of nonlinear coupled buildings with smooth hysteretic behavior. **Engineering Structures**, 191, p. 536-548, 2019/07/15/ 2019a.

AL-FAHDAWI, O. A. S.; BARROSO, L. R.; SOARES, R. W. Simple adaptive control method for mitigating the seismic responses of coupled adjacent buildings considering parameter variations. **Engineering Structures**, 186, p. 369-381, 2019/05/01/ 2019b.

ALI, M. M.; MOON, K. S. Structural developments in tall buildings: current trends and future prospects. **Architectural science review**, 50, n. 3, p. 205-223, 2007.

ALMAJHALI, K. Y. M. Review on passive energy dissipation devices and techniques of installation for high rise building structures. **Structures**, 51, p. 1019-1029, May 2023.

ALOTTA, G.; BIONDO, C.; GIARALIS, A.; FAILLA, G. Seismic protection of land-based wind turbine towers using the tuned inerter damper. **Structures**, 51, p. 640-656, May 2023.

ALUJEVIĆ, N.; ČAKMAK, D.; WOLF, H.; JOKIĆ, M. Passive and active vibration isolation systems using inerter. **Journal of Sound and Vibration**, 418, p. 163-183, 2018/03/31/ 2018.

ARAZ, O. Optimization of tuned mass damper inerter for a high-rise building considering soil-structure interaction. **Archive of Applied Mechanics**, 92, n. 10, p. 2951-2971, 2022/10/01 2022.

ASHASI-SORKHABI, A.; MALEKGHASEMI, H.; GHAEMMAGHAMI, A.; MERCAN, O. Experimental investigations of tuned liquid damper-structure interactions in resonance considering multiple parameters. **Journal of Sound and Vibration**, 388, p. 141-153, 2017/02/03/ 2017.

AVILA, S. Controle híbrido para atenuação de vibrações em edifícios. **Pontífica Universidade Católica do Rio de Janeiro**, 2002.

AYDIN, E.; ÖZTÜRK, B.; DUTKIEWICZ, M. Analysis of efficiency of passive dampers in multistorey buildings. **Journal of Sound and Vibration**, 439, p. 17-28, 2019/01/20/ 2019.

AZARSA, P.; HOSSEINI, M.; AHMADI, S. A.; RAO, N. Seismic Behavior of Steel Buildings using Viscous Fluid Dampers by Non Linear Time History Analysis. **International Journal of Engineering and Management Research (IJEMR)**, 6, n. 6, p. 143-159, 2016.

BADUIDANA, M.; KENFACK-JIOTSA, A. Minimization of the Primary Structure Response Under Random Excitation Using High-Performance Passive Tuned Mass Damper Inerter Control Configurations. **Journal of Vibration Engineering & Technologies**, 2022 Dec 2022.

BAGHERI, S.; RAHMANI-DABBAGH, V. Seismic response control with inelastic tuned mass dampers. **Engineering Structures**, 172, p. 712-722, 2018/10/01/ 2018.

BAHETI, A. S.; MATSAGAR, V. A. Wind and Seismic Response Control of Dynamically Similar Adjacent Buildings Connected Using Magneto-Rheological Dampers. **Infrastructures**, 7, n. 12, Dec 2022.

BALENDRA, T.; WANG, C. M.; CHEONG, H. F. Effectiveness of tuned liquid column dampers for vibration control of towers. **Engineering Structures**, 17, n. 9, p. 668-675, 1995/11/01/ 1995.

BANERJI, P., 2004, **Tuned Liquid Dampers for Control of Earthquake**.

BARBAT, A. H.; BOZZO, L. M. Seismic analysis of base isolated buildings. **Archives of Computational Methods in Engineering**, 4, n. 2, p. 153-192, 1997/06/01 1997.

BASILI, M.; DE ANGELIS, M.; PIETROSANTI, D. Modal analysis and dynamic response of two adjacent single-degree-of-freedom systems linked by spring-dashpot-inerter elements. **Engineering Structures**, 174, p. 736-752, 2018/11/01/ 2018.

BASILI, M.; DE ANGELIS, M.; PIETROSANTI, D. Defective two adjacent single degree of freedom systems linked by spring-dashpot-inerter for vibration control. **Engineering Structures**, 188, p. 480-492, 2019/06/01/ 2019.

BASILI, M.; DE ANGELIS, M. D.; PIETROSANTI, D. Dynamic response of a viscously damped two adjacent degree of freedom system linked by inerter subjected to base harmonic excitation. **Procedia Engineering**, 199, p. 1586-1591, 2017/01/01/ 2017.

BAUER, H. F. Oscillations of immiscible liquids in a rectangular container: A new damper for excited structures. **Journal of Sound and Vibration**, 93, n. 1, p. 117-133, 1984/03/08/ 1984.

BESHARATIAN, B.; TAJMIR RIAHI, H.; GARCIA, R.; HAJIRASOULIHA, I. Particle swarm optimization of friction tuned mass dampers subjected to ground motion records. **Soil Dynamics and Earthquake Engineering**, 172, p. 107995, 2023/09/01/ 2023.

BIGDELI, K. **Optimal placement and design of passive damper connectors for adjacent structures**. 2012. -, University of British Columbia.

BIGDELI, K.; HARE, W.; NUTINI, J.; TEFAMARIAM, S. Optimizing damper connectors for adjacent buildings. **Optimization and Engineering**, 17, n. 1, p. 47-75, 2016/03/01 2016.

BIGDELI, Y.; KIM, D. Response control of irregular structures using structure-TLCD coupled system under seismic excitations. **KSCE Journal of Civil Engineering**, 19, n. 3, p. 672-681, 2015/03/01 2015.

BIGDELI, Y.; KIM, D. Damping effects of the passive control devices on structural vibration control: TMD, TLC and TLCD for varying total masses. **KSCE Journal of Civil Engineering**, 20, n. 1, p. 301-308, 2016/01/01 2016.

BITEW, L.; HABTE, B. Numerical investigation of structural models equipped with tuned liquid damper. **Journal of Vibration and Control**, 2023 Jul 2023.

BRANDAO, F. D.; DE ALMEIDA, A. K.; MIGUEL, L. F. F. Optimum Design of Single and Multiple Tuned Mass Dampers for Vibration Control in Buildings Under Seismic Excitation. **International Journal of Structural Stability and Dynamics**, 22, n. 08, Jun 2022.

BRZESKI, P.; KAPITANIAK, T.; PERLIKOWSKI, P. Novel type of tuned mass damper with inerter which enables changes of inertance. **Journal of Sound and Vibration**, 349, p. 56-66, 2015/08/04/ 2015.

BRZESKI, P.; LAZAREK, M.; PERLIKOWSKI, P. Experimental study of the novel tuned mass damper with inerter which enables changes of inertance. **Journal of Sound and Vibration**, 404, p. 47-57, 2017/09/15/ 2017.

CAICEDO, D.; LARA-VALENCIA, L.; BLAND, J. Optimal design and performance evaluation of tuned mass damper inerter in building structures. **Revista Facultad De Ingenieria-Universidad De Antioquia**, n. 106, p. 66-77, Jan-Mar 2023.

CHAKRABORTY, S.; DEBBARMA, R.; MARANO, G. C. Performance of tuned liquid column dampers considering maximum liquid motion in seismic vibration control of structures. **Journal of Sound and Vibration**, 331, n. 7, p. 1519-1531, 2012/03/26/ 2012.

CHANG, C. C.; HSU, C. T. Control performance of liquid column vibration absorbers. **Engineering Structures**, 20, n. 7, p. 580-586, 1998/07/01/ 1998.

CHEN, H. J.; SU, W. J.; WANG, F. C. Modeling and analyses of a connected multi-car train system employing the inerter. **Advances in Mechanical Engineering**, 9, n. 8, Aug 2017.

CHEN, H. J.; WANG, F. C.; IEEE, 2014, Vienna, AUSTRIA. **Benefits of Inerters for Multi-Car Trains**. 2014. 278-283. Disponível em: <Go to ISI>://WOS:000378931500048.

CHEN, J.; KONG, F.; PENG, Y. A stochastic harmonic function representation for non-stationary stochastic processes. **Mechanical Systems and Signal Processing**, 96, p. 31-44, 2017/11/01/ 2017.

CHEN, M. Z. Q.; HU, Y.; LI, C.; CHEN, G. Semi-active suspension with semi-active inerter and semi-active damper. **IFAC Proceedings Volumes**, 47, n. 3, p. 11225-11230, 2014/01/01/ 2014.

CHEN, M. Z. Q.; PAPAGEORGIOU, C.; SCHEIBE, F.; WANG, F. C.; SMITH, M. C. The missing mechanical circuit element. **IEEE Circuits and Systems Magazine**, 9, n. 1, p. 10-26, 2009.

CHEN, P.; WU, X. B. Investigations on the Dynamic Response of Adjacent Buildings Connected by Viscous Dampers. **Buildings**, 12, n. 9, Sep 2022.

CHEN, Q.; ZHAO, Z.; XIA, Y.; PAN, C. *et al.* Comfort based floor design employing tuned inerter mass system. **Journal of Sound and Vibration**, 458, p. 143-157, 2019/10/13/ 2019.

CHEN, Q.; ZHAO, Z.; ZHANG, R. An inerter-system chain and energy-based optimal control of adjacent single-degree-of-freedom structures. **Smart Structures and Systems**, 28, n. 2, p. 15, 2021.

CHEN, Q. J.; ZHANG, L. Q.; ZHANG, R. F.; PAN, C. Seismic Performance of an Underground Structure with an Inerter-Based Isolation System. **Structural Control & Health Monitoring**, 2023, Apr 2023.

CHRISTENSON, R. E.; SPENCER, B. F.; JOHNSON, E. A. Semiactive Connected Control Method for Adjacent Multidegree-of-Freedom Buildings. **Journal of Engineering Mechanics**, 133, n. 3, p. 290-298, 2007.

CHRISTENSON, R. E.; SPENCER, B. F.; JOHNSON, E. A.; SETO, K. Coupled Building Control Considering the Effects of Building/Connector Configuration. 132, n. 6, p. 853-863, 2006.

CLOUGH, R. W.; PENZIEN, J. Dynamics of structures. Berkeley. **CA: Computers and Structures**, 2003.

COUNCIL, A. T. **Quantification of building seismic performance factors**. US Department of Homeland Security, FEMA, 2009.

CUI, Y.; GENG, Z.; ZHU, Q.; HAN, Y. Review: Multi-objective optimization methods and application in energy saving. **Energy**, 125, p. 681-704, 2017/04/15/ 2017.

CURADELLI, O.; AMANI, M. Integrated structure-passive control design of linear structures under seismic excitations. **Engineering Structures**, 81, p. 256-264, 2014/12/15/ 2014.

CUTFIELD, M.; MA, Q.; RYAN, K., 2014, **Cost-benefit analysis of base isolated and conventional buildings: A case study**. 8.

DA COSTA, P. D. O. B. **Otimização de absorvedores dinâmicos de vibração inerter para o controle de vibrações de edifícios submetidos à demanda sísmica**. 2023. 180 f. Dissertação de Mestrado (Mestre) - Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. Disponível em: <http://www.bibliotecadigital.ufrgs.br/da.php?nrb=001174470&loc=2023&l=7421e352df5abc9>.

DAS, S.; CHOUDHURY, S. Seismic response control by tuned liquid dampers for low-rise RC frame buildings. **Australian Journal of Structural Engineering**, 18, n. 2, p. 135-145, 2017/04/03 2017.

DE ANGELIS, M.; GIARALIS, A.; PETRINI, F.; PIETROSANTI, D. Optimal tuning and assessment of inertial dampers with grounded inerter for vibration control of seismically excited base-isolated systems. **Engineering Structures**, 196, p. 109250, 2019/10/01/ 2019.

DE DOMENICO, D.; IMPOLLONIA, N.; RICCIARDI, G. Soil-dependent optimum design of a new passive vibration control system combining seismic base isolation with tuned inerter damper. **Soil Dynamics and Earthquake Engineering**, 105, p. 37-53, 2018/02/01/ 2018.

DE DOMENICO, D.; QIAO, H.; WANG, Q.; ZHU, Z.; MARANO, G. Optimal design and seismic performance of Multi-Tuned Mass Damper Inerter (MTMDI) applied to adjacent high-rise buildings. 29, n. 14, p. e1781, 2020.

DE DOMENICO, D.; QUARANTA, G.; RICCIARDI, G.; LACARBONARA, W. Optimum design of tuned mass damper with pinched hysteresis under nonstationary stochastic seismic ground motion. **Mechanical Systems and Signal Processing**, 170, May 2022.

DE DOMENICO, D.; RICCIARDI, G. Earthquake protection of structures with nonlinear viscous dampers optimized through an energy-based stochastic approach. **Engineering Structures**, 179, p. 523-539, Jan 2019.

DE LA FUENTE, E. An efficient procedure to obtain exact solutions in random vibration analysis of linear structures. **Engineering Structures**, 30, n. 11, p. 2981-2990, 2008/11/01/ 2008.

DE SOUZA, O. A. P.; MIGUEL, L. F. F. CIOA: Circle-Inspired Optimization Algorithm, an algorithm for engineering optimization. **SoftwareX**, 19, p. 101192, 2022/07/01/ 2022.

DE DOMENICO, D.; RICCIARDI, G. An enhanced base isolation system equipped with optimal tuned mass damper inerter (TMDI). 47, n. 5, p. 1169-1192, 2018.

DEODATIS, G. Non-stationary stochastic vector processes: seismic ground motion applications. **Probabilistic Engineering Mechanics**, 11, n. 3, p. 149-167, 1996/07/01/ 1996.

DER KIUREGHIAN, A. **On response of structures to stationary excitation**. University of California, Earthquake Engineering Research Center Berkeley ..., 1979.

DI MATTEO, A.; MASNATA, C.; ADAM, C.; PIRROTTA, A. Optimal design of tuned liquid column damper inerter for vibration control. **Mechanical Systems and Signal Processing**, 167, Mar 2022.

DJEROUNI, S.; ABDEDDAIM, M.; OUNIS, A. Seismic response control of adjacent buildings using optimal backward-shared tuned mass damper inerter and optimal backward-shared tuned inerter damper. **Asian Journal of Civil Engineering**, 22, n. 8, p. 1499-1523, 2021/12/01 2021.

DJEROUNI, S.; ELIAS, S.; ABDEDDAIM, M.; DE DOMENICO, D. Effectiveness of Optimal Shared Multiple Tuned Mass Damper Inerters for Pounding Mitigation of Adjacent Buildings. **Practice Periodical on Structural Design and Construction**, 28, n. 1, Feb 2023.

DJEROUNI, S.; ELIAS, S.; ABDEDDAIM, M.; RUPAKHETY, R. Optimal design and performance assessment of multiple tuned mass damper inerters to mitigate seismic pounding of adjacent buildings. **Journal of Building Engineering**, 48, p. 103994, 2022/05/01/ 2022.

DOLCE, M.; CARDONE, D.; MARNETTO, R. Implementation and testing of passive control devices based on shape memory alloys. **Earthquake Engineering & Structural Dynamics**, 29, n. 7, p. 945-968, 2000.

DONG, X.; LIU, Y.; CHEN, M. Z. Q., 2015, **Application of inerter to aircraft landing gear suspension**. 2066-2071.

DOROUDI, R.; HOSSEINI LAVASSANI, S. H. Connection of coupled buildings: A state-of-the-art review. **Structures**, 33, p. 1299-1326, 2021/10/01/ 2021.

EGBELAKIN, T.; OGUNMAKINDE, O. E.; OMOTAYO, T.; SOJOBI, A. Demystifying the Barriers and Motivators for the Adoption of Base Isolation Systems in New Zealand. **Buildings**, 12, n. 5, May 2022.

ELIAS, S. Seismic Energy Assessment of Buildings with Tuned Vibration Absorbers. **Shock and Vibration**, 2018, p. 2051687, 2018/10/18 2018.

ELIAS, S.; MATSAGAR, V. Research developments in vibration control of structures using passive tuned mass dampers. **Annual Reviews in Control**, 44, p. 129-156, 2017/01/01/ 2017.

ELIAS, S.; MATSAGAR, V.; DATTA, T. K. Distributed Tuned Mass Dampers for Multi-Mode Control of Benchmark Building under Seismic Excitations. **Journal of Earthquake Engineering**, 23, n. 7, p. 1137-1172, 2019/08/09 2019.

ELWARDANY, H.; MOSA, B.; KHEDR, M. D. E.; SELEEMAH, A. Effect of earthquake induced-pounding on the response of four adjacent buildings in series. **Structural Engineering and Mechanics**, 83, n. 2, p. 153-166, Jul 2022.

ESPINOZA, G.; CARRILLO, C.; SUAZO, A. Analysis of a tuned liquid column damper in non-linear structures subjected to seismic excitations. **Latin American Journal of Solids and Structures**, 15, 2018.

ESWARAN, M.; ATHUL, S.; NIRAJ, P.; REDDY, G. R.; RAMESH, M. R. Tuned liquid dampers for multi-storey structure: numerical simulation using a partitioned FSI algorithm and experimental validation. **Sādhanā**, 42, n. 4, p. 449-465, 2017/04/01 2017.

ETEDALI, S.; RAKHSHANI, H. Optimum design of tuned mass dampers using multi-objective cuckoo search for buildings under seismic excitations. **Alexandria Engineering Journal**, 57, n. 4, p. 3205-3218, 2018/12/01/ 2018.

EVANGELOU, S.; LIMEBEER, D. J. N.; SHARP, R. S.; SMITH, M. C., 2004, **Steering compensation for high-performance motorcycles**. 749-754 Vol.741.

EVANGELOU, S.; LIMEBEER, D. J. N.; SHARP, R. S.; SMITH, M. C. Mechanical Steering Compensators for High-Performance Motorcycles. **Journal of Applied Mechanics**, 74, n. 2, p. 332-346, 2006.

FAN, F. G.; AHMADI, G.; MOSTAGHEL, N.; TADJBAKHSI, I. G. Performance analysis of aseismic base isolation systems for a multi-story building. **Soil Dynamics and Earthquake Engineering**, 10, n. 3, p. 152-171, 1991/04/01/ 1991.

FANG, J.; LIU, W.; CHEN, L.; LAURIA, S. *et al.* A Survey of Algorithms, Applications and Trends for Particle Swarm Optimization. **International Journal of Network Dynamics and Intelligence**, 2, n. 1, p. 24-50, 03/27 2023.

FARZAMPOUR, A.; ASL, A. K. Performance of tuned mass dampers in vibration response control of base-excited structures. **Journal of Civil, Construction and Environmental Engineering**, 2, n. 3, p. 87-94, 2017.

FEI, Z.; JINTING, W.; FENG, J.; LIQIAO, L. Control performance comparison between tuned liquid damper and tuned liquid column damper using real-time hybrid simulation. **Earthquake Engineering and Engineering Vibration**, 18, n. 3, p. 695-701, 2019/07/01 2019.

FENG, Z. Q.; JING, H. K.; WU, Q. Q.; LI, Y. S.; HUA, X. G. Performance Evaluation of Inerter-Based Dampers for Bridge Flutter Control: A Comparative Study. **International Journal of Structural Stability and Dynamics**, 2023 Jul 2023.

FRAHM, H. Device for Damping Vibrations of Bodies. OFFICE, U. S. P. United States. US989958A: 9 p. 1911.

FREITAS, M.; PEDROSO, L. A Comparative Analysis of TLCD-Equipped Shear Buildings under Dynamic Loads. **Journal of Applied and Computational Mechanics**, 5, n. 1, p. 40-45, 2019.

FU-CHENG, W.; CHENG-WEI, C.; MIN-KAI, L.; MIN-FENG, H., 2007, **Performance analyses of building suspension control with inerters**. 3786-3791.

G1. **Número de mortos por terremoto na Turquia e na Síria passa de 50 mil.** 2023. Disponível em: <https://g1.globo.com/mundo/noticia/2023/02/24/numero-de-mortos-na-turquia-e-na-siria-passa-de-50-mil.ghtml>. Acesso em: 05/06/2023.

GAO, H.; KWOK, K. C. S.; SAMALI, B. Optimization of tuned liquid column dampers. **Engineering Structures**, 19, n. 6, p. 476-486, 1997/06/01/ 1997.

GAO, H.; KWOK, K. S. C.; SAMALI, B. Characteristics of multiple tuned liquid column dampers in suppressing structural vibration. **Engineering Structures**, 21, n. 4, p. 316-331, 1999/04/01/ 1999.

GARTNER, B. J.; SMITH, M. C. Damping and inertial hydraulic device. PATENT, U. S. United States. US2015/0167773A1: 29 p. 2015.

GATTULLI, V.; POTENZA, F.; SPENCER, B. F. Design criteria for dissipative devices in coupled oscillators under seismic excitation. **Structural Control and Health Monitoring**, 25, n. 7, p. e2167, 2018.

GE, Z.; LI, G. P.; CHEN, S. X.; WANG, W. R. Influence of Nonlinear Characteristics of Planetary Flywheel Inerter Actuator on Vehicle Active Suspension Performance. **Actuators**, 12, n. 6, Jun 2023.

GHASSEMPOUR, M.; FAILLA, G.; ARENA, F. Vibration mitigation in offshore wind turbines via tuned mass damper. **Engineering Structures**, 183, p. 610-636, 2019/03/15/ 2019.

GIARALIS, A.; PETRINI, F. Optimum design of the tuned mass-damper-inerter for serviceability limit state performance in wind-excited tall buildings. **Procedia Engineering**, 199, p. 1773-1778, 2017/01/01/ 2017a.

GIARALIS, A.; PETRINI, F. Wind-Induced Vibration Mitigation in Tall Buildings Using the Tuned Mass-Damper-Inerter. 143, n. 9, p. 04017127, 2017b.

GIARALIS, A.; TAFLANIDIS, A. A. Reliability-based design of tuned mass-damper-inerter (TMDI) equipped multi-storey frame buildings under seismic excitation. *In: Proceedings of the 12th International Conference on Applications of Statistics and Probability in Civil Engineering (ICASP12)*. Vancouver: University of British Columbia Library, 2015.

GIARALIS, A.; TAFLANIDIS, A. A. Optimal tuned mass-damper-inerter (TMDI) design for seismically excited MDOF structures with model uncertainties based on reliability criteria. 25, n. 2, p. e2082, 2018.

GONZALEZ-BUELGA, A.; LAZAR, I. F.; JIANG, J. Z.; NEILD, S. A.; INMAN, D. J. Assessing the effect of nonlinearities on the performance of a tuned inerter damper. 24, n. 3, p. e1879, 2017.

GRAHAM, M. C. **Design strategies for coupling buildings**. 1994. 148 f. (Master of Science) - Department of Civil and Environmental Engineering, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge.

HAJMOOSA, R.; MANSOORGHENAEI, M. Effect of Viscous Dampers application on the seismic response of a High Rise Building. **Journal of Civil Engineering Researchers**, 1, n. 4, p. 29-37, 04/20 2017.

HAMDY, M.; NGUYEN, A.-T.; HENSEN, J. L. M. A performance comparison of multi-objective optimization algorithms for solving nearly-zero-energy-building design problems. **Energy and Buildings**, 121, p. 57-71, 2016/06/01/ 2016.

HAO, L. F.; HE, H.; TAN, P.; JIN, K. W.; LIU, X. Y. Performance and efficiency oriented optimal design of tuned inerter damper for seismic response control of building structures. **International Journal of Mechanical Sciences**, 253, Sep 2023.

HAROUN, M. A.; PIRES, J. A.; WON, A. Y. J. Suppression of Environmentally-Induced Vibrations in Tall Buildings by Hybrid Liquid Column Dampers. **The Structural Design of Tall Buildings**, 5, n. 1, p. 45-54, 1996.

HATIPOGLU, Y. S.; DUZGUN, O. A. Seismic response of adjacent buildings interconnected by viscous dampers considering soil-structure interaction. **Earthquakes and Structures**, 24, n. 3, p. 165-181, Mar 2023.

HATZIGEORGIU, G. D.; PNEVMATIKOS, N. G. Maximum damping forces for structures with viscous dampers under near-source earthquakes. **Engineering Structures**, 68, p. 1-13, 2014/06/01/ 2014.

HE, H.; YOU, C. H.; TAN, P.; XIANG, Y.; YANG, K. Effective damping ratio enhancement effect of tuned inerter dampers for seismic response control of civil structures. **Engineering Structures**, 279, Mar 2023.

HE, X.; LU, Z. Seismic fragility assessment of a super tall building with hybrid control strategy using IDA method. **Soil Dynamics and Earthquake Engineering**, 123, p. 278-291, 2019/08/01/ 2019.

HEREDIA-ZAVONI, E.; VANMARCKE, E. H. Closure to “Seismic Random-Vibration Analysis of Multisupport-Structural Systems” by Ernesto Heredia-Zavoni and Erik H. Vanmarcke. **Journal of Engineering Mechanics**, 121, n. 9, p. 1037-1038, 1995.

HOUSNER, G. W.; BERGMAN, L. A.; CAUGHEY, T. K.; CHASSIAKOS, A. G. *et al.* Structural control: Past, present, and future. **Journal of Engineering Mechanics**, 123, n. 9, p. 897-971, Sep 1997a.

HOUSNER, G. W.; BERGMAN, L. A.; CAUGHEY, T. K.; CHASSIAKOS, A. G. *et al.* Structural Control: Past, Present, and Future. 123, n. 9, p. 897-971, 1997b.

HU, Y.; CHEN, M. Z. Q.; SHU, Z. Passive vehicle suspensions employing inerters with multiple performance requirements. **Journal of Sound Vibration**, 333, p. 2212-2225, April 01, 2014 2014.

IKAGO, K.; SAITO, K.; INOUE, N. Seismic control of single-degree-of-freedom structure using tuned viscous mass damper. 41, n. 3, p. 453-474, 2012.

IKEDA, Y.; YAMAMOTO, M.; FURUHASHI, T.; KURINO, H. Recent research and development of structural control in Japan. **JAPAN ARCHITECTURAL REVIEW**, 2, n. 3, p. 219-225, 2019.

ISMAIL, M. An elastoplastic bracing system for structural vibration control. **Engineering Structures**, 200, p. 109671, 2019/12/01/ 2019.

JIANG, J. Z.; MATAMOROS-SANCHEZ, A. Z.; GOODALL, R. M.; SMITH, M. C. Passive suspensions incorporating inerters for railway vehicles. **Vehicle System Dynamics**, 50, n. sup1, p. 263-276, 2012/01/01 2012.

JUNG, J. W.; KIM, M. K.; KIM, J. H. Experimental study on the floor responses of a base-isolated frame structure via shaking table tests. **Engineering Structures**, 253, Feb 2022.

JURUKOVSKI, D.; PETKOVSKI, M.; RAKICEVIC, Z. Energy absorbing elements in regular and composite steel frame structures. **Engineering Structures**, 17, p. 319-333, January 01, 1995 1995.

KANDEMIR, E. C.; JANKOWSKI, R. Effect of soil on the capacity of viscous dampers between adjacent buildings. **GRAĐEVINAR**, 75, n. 4, p. 14, 2023.

KANG, N.; KIM, H.; CHOI; SEONGWOO JO, S. *et al.* Performance Evaluation of TMD under Typhoon Using System Identification and Inverse Wind Load Estimation. **Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering**, 27, n. 6, p. 455-473, 2012.

KANG, X. F.; TANG, J. J.; LI, F.; WU, J. *et al.* Optimal Tuned Inerter Dampers for Vibration Control Performance of Adjacent Building Structures. **Buildings**, 13, n. 7, Jul 2023.

KAVYASHREE, B. G.; PATIL, S.; RAO, V. S. Review on vibration control in tall buildings: from the perspective of devices and applications. **International Journal of Dynamics and Control**, 9, n. 3, p. 1316-1331, 2021/09/01 2021.

KELLY, J. M. The role of damping in seismic isolation. **Earthquake Engineering & Structural Dynamics**, 28, n. 1, p. 3-20, 1999.

KELLY, J. M.; SKINNER, R. I.; HEINE, A. J. Mechanisms of energy absorption in special devices for use in earthquake resistant structures. **Bulletin of the New Zealand Society for Earthquake Engineering**, 5, n. 3, p. 63-88, 09/30 1972.

KENNEDY, J.; EBERHART, R., 1995, **Particle swarm optimization**. 1942-1948 vol.1944.

KHALID, M. A.; BANSAL, S. Framework for Robust Design Optimization of Tuned Mass Dampers by Stochastic Subset Optimization. **International Journal of Structural Stability and Dynamics**, 2023 Feb 2023.

KLEIN, R. E.; CUSANO, C.; STUKEL, J. Investigation of a method to stabilize wind induced oscillations in large structures. *In: ASME Winter Annual Meeting*, 1972, New York, USA. **72**.

KLEIN, R. E.; HEALY, M. D. Semi-active control of wind induced oscillations in structures. *In: Proceedings of 2nd International Conference on Structural Control*, 1987, Ontario. Martinus Nijhoff Publishers.

KOBORI, T.; KOSHIKA, N.; YAMADA, K.; IKEDA, Y. Seismic-response-controlled structure with active mass driver system. Part 1: Design. 20, n. 2, p. 133-149, 1991a.

KOBORI, T.; KOSHIKA, N.; YAMADA, K.; IKEDA, Y. Seismic-response-controlled structure with active mass driver system. Part 2: Verification. 20, n. 2, p. 151-166, 1991b.

KOMODROMOS, P.; POLYCARPOU, P. C.; PAPALOIZOU, L.; PHOCAS, M. C. Response of seismically isolated buildings considering poundings. **Earthquake Engineering & Structural Dynamics**, 36, n. 12, p. 1605-1622, 2007.

KUZNETSOV, A.; MAMMADOV, M.; SULTAN, I.; HAJILAROV, E. Optimization of improved suspension system with inerter device of the quarter-car model in vibration analysis. **Archive of Applied Mechanics**, 81, n. 10, p. 1427-1437, 2011/10/01 2011.

LAI, Y. A.; CHANG, C. H.; YANG, C. Y.; CHANG, C. M. Design of Optimal Passive Tuned Mass Damper with Static Output Feedback and Updating Iterative Procedure. **Structural Control & Health Monitoring**, 2023, Jun 2023.

LAVASSANI, S. H. H.; KONTONI, D. P. N.; ALIZADEH, H.; GHAREHBAGHI, V. Passive Control of Ultra-Span Twin-Box Girder Suspension Bridges under Vortex-Induced Vibration Using Tuned Mass Dampers: A Sensitivity Analysis. **Buildings**, 13, n. 5, May 2023.

LAZAR, I. F.; NEILD, S. A.; WAGG, D. J. Using an inerter-based device for structural vibration suppression. 43, n. 8, p. 1129-1147, 2014.

LAZAR, I. F.; NEILD, S. A.; WAGG, D. J., 2015, Orlando, FL. **Performance Analysis of Cables with Attached Tuned-Inerter-Dampers**. 2015. 433-441. Disponível em: <Go to ISI>://WOS:000374105200044.

LAZAR, I. F.; NEILD, S. A.; WAGG, D. J. Vibration suppression of cables using tuned inerter dampers. **Engineering Structures**, 122, p. 62-71, 2016/09/01/ 2016.

LI, L. X.; LIANG, Y.; CHEN, G. H.; YANG, D. X. Simultaneous layout and size optimization of nonlinear viscous dampers for frame buildings under stochastic seismic excitation. **Engineering Structures**, 273, Dec 2022.

LI, Q. S.; ZHI, L.-H.; TUAN, A. Y.; KAO, C.-S. *et al.* Dynamic Behavior of Taipei 101 Tower: Field Measurement and Numerical Analysis. **Journal of Structural Engineering**, 137, n. 1, p. 143-155, 2011.

LI, Y.; JIANG, J. Z.; SARTOR, P.; NEILD, S. A.; WANG, H. Including Inerters in Aircraft Landing Gear Shock Strut to Improve the Touch-down Performance. **Procedia Engineering**, 199, p. 1689-1694, 2017/01/01/ 2017.

LI, Y.; LI, S.; CHEN, Z. Optimal design and effectiveness evaluation for inerter-based devices on mitigating seismic responses of base isolated structures. **Earthquake Engineering and Engineering Vibration**, 20, n. 4, p. 1021-1032, 2021/10/01 2021.

LI, Y. F.; LI, S. Y.; TAN, P. A novel tuned mass damper inerter: optimal design, effectiveness comparison, and robustness investigation. **Structures**, 55, p. 1262-1276, Sep 2023.

LIANG, Q. G.; WEI, J. Y.; LI, L. Y. Seismic Control of Story Isolation System Using Tuned Mass Damper Inerter. **Journal of Engineering Mechanics**, 149, n. 3, Mar 2023.

LIU, X. P.; LI, S. Y.; WU, C. Y.; ZHONG, Y. L.; BIAN, Y. F. Research on Vibration Control of Power Transmission Lines-TMDI Based on Colliding Bodies Optimization. **Buildings**, 12, n. 12, Dec 2022.

LIU, Y.; CHEN, M. Z. Q.; TIAN, Y., 2015, **Nonlinearities in landing gear model incorporating inerter**. 696-701.

LIU, Z.; LIU, W.; PENG, Y. Random function based spectral representation of stationary and non-stationary stochastic processes. **Probabilistic Engineering Mechanics**, 45, p. 115-126, 2016/07/01/ 2016.

LO FEUDO, S.; TOUZÉ, C.; BOISSON, J.; CUMUNEL, G. Nonlinear magnetic vibration absorber for passive control of a multi-storey structure. **Journal of Sound and Vibration**, 438, p. 33-53, 2019/01/06/ 2019.

LOSANNO, D.; LONDONO, J.; ZINNO, S.; SERINO, G. Effective damping and frequencies of viscous damper braced structures considering the supports flexibility. **Computers & Structures**, 207, p. 121-131, 2018.

LOVE, J. S.; LEE, C. S. Nonlinear Series-Type Tuned Mass Damper-Tuned Sloshing Damper for Improved Structural Control. **Journal of Vibration and Acoustics**, 141, n. 2, 2018.

LU, L.; XU, J.; ZHOU, Y.; LU, W.; SPENCER, B. F. Viscous inertial mass damper (VIMD) for seismic responses control of the coupled adjacent buildings. **Engineering Structures**, 233, p. 111876, 2021/04/15/ 2021.

LUCO, J. E.; DE BARROS, F. C. P. Optimal damping between two adjacent elastic structures. 27, n. 7, p. 649-659, 1998a.

LUCO, J. E.; DE BARROS, F. C. P. Optimal damping between two adjacent elastic structures. **Earthquake Engineering & Structural Dynamics**, 27, n. 7, p. 649-659, 1998b.

MA, R.; BI, K.; HAO, H. Inerter-based structural vibration control: A state-of-the-art review. **Engineering Structures**, 243, p. 112655, 2021/09/15/ 2021.

MADHAMSHETTY, K.; MANIMALA, J. M. Low-Rate Characterization of a Mechanical Inerter. **Machines**, 6, n. 3, p. 32, 2018.

MAHMOODI, P. Structural Dampers. **Journal of the Structural Division**, 95, n. 8, p. 1661-1672, 1969.

MAKRIS, N. Seismic isolation: Early history. **Earthquake Engineering & Structural Dynamics**, 48, n. 2, p. 269-283, 2019.

MAKRIS, N.; CONSTANTINOU, M. Viscous Dampers: testing, Modeling and Application in Vibration and Seismic Isolation: Technical Report NCEER-90-0028. **State University at Buffalo: Buffalo, NY, USA**, 1990.

MARIAN, L.; GIARALIS, A. Optimal design of inerter devices combined with TMDs for vibration control of buildings exposed to stochastic seismic excitation. *In*: DEODATIS, G.; ELLINGWOOD, B. R. e FRANGOPOLO, D. M. (Ed.). **Safety, Reliability, Risk and Life-Cycle Performance of Structures and Infrastructures**. Boca Raton: CRC Press, 2013. p. 1025-1032.

MARIAN, L.; GIARALIS, A. Optimal design of a novel tuned mass-damper–inerter (TMDI) passive vibration control configuration for stochastically support-excited structural systems. **Probabilistic Engineering Mechanics**, 38, p. 156-164, 2014/10/01/ 2014.

MARTÍNEZ, C. A.; CURADELLI, O.; COMPAGNONI, M. E. Optimal design of passive viscous damping systems for buildings under seismic excitation. **Journal of Constructional Steel Research**, 90, p. 253-264, 2013/11/01/ 2013.

MASNATA, C.; DI MATTEO, A.; ADAM, C.; PIRROTTA, A. Smart structures through nontraditional design of Tuned Mass Damper Inerter for higher control of base isolated systems. **Mechanics Research Communications**, 105, p. 103513, 2020/04/01/ 2020.

MEHMANDOUSTI, A. M. A.; JALAEFFAR, A. Effect of seismic sequences on behavior of mid-rise steel moment-resisting frames equipped with fluid viscous dampers. **Structures**, 54, p. 657-668, Aug 2023.

MENDES, M. V.; COLHERINHAS, G. B.; DE MORAIS, M. V. G.; PEDROSO, L. J. Optimum TLCD for Mitigation of Offshore Wind Turbine Dynamic Response Considering Soil-Structure Interaction. **International Journal of Structural Stability and Dynamics**, 2023 Apr 2023.

MIGUEL, L. F. F. **Estudo Teórico e Experimental de Amortecedores de Vibração por Atrito**. 2002. 177 f. Dissertação de Mestrado (Mestre) - Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. Disponível em: <https://lume.ufrgs.br/handle/10183/2443>.

MIGUEL, L. F. F.; DE SOUZA, O. A. P. Robust optimum design of MTMD for control of footbridges subjected to human-induced vibrations via the CIOA. **Structural Engineering and Mechanics**, 86, n. 5, p. 647-661, Jun 2023.

MIGUEL, L. F. F.; DOS SANTOS, G. P. Optimization of Multiple Tuned Mass Dampers for Road Bridges Taking into Account Bridge-Vehicle Interaction, Random Pavement Roughness, and Uncertainties. **Shock and Vibration**, 2021, Apr 2021.

MIGUEL, L. F. F.; LOPEZ, R. H. Methodology for the simultaneous optimization of location and parameters of friction dampers in the frequency domain. **Engineering Optimization**, 50, n. 12, p. 2108-2122, Dec 2018.

MIGUEL, L. F. F.; LOPEZ, R. H.; TORII, A. J.; BECK, A. T. Reliability-based optimization of multiple Folded Pendulum TMDs through Efficient Global Optimization. **Engineering Structures**, 266, Sep 2022.

MIGUEL, L. F. F.; MIGUEL, L. F. F.; LOPEZ, R. H. Failure probability minimization of buildings through passive friction dampers. **Structural Design of Tall and Special Buildings**, 25, n. 17, p. 869-885, Dec 2016a.

MIGUEL, L. F. F.; MIGUEL, L. F. F.; LOPEZ, R. H. Simultaneous optimization of force and placement of friction dampers under seismic loading. **Engineering Optimization**, 48, n. 4, p. 582-602, Apr 2016b.

MILANCHIAN, R.; HOSSEINI, M. Study of vertical seismic isolation technique with nonlinear viscous dampers for lateral response reduction. **Journal of Building Engineering**, 23, p. 144-154, 2019/05/01/ 2019.

MONDAL, J.; NIMMALA, H.; ABDULLA, S.; TAFRESHI, R., 2014, **Tuned liquid damper**.

MUBULI, A.; NIGDELI, S. M.; BEKDAS, G. Optimum Design of Tuned Mass Dampers for Structures with Torsional Irregularity via Jaya Algorithm. **Journal of Vibration Engineering & Technologies**, 2023 Apr 2023.

NABID, N.; HAJIRASOULIHA, I.; PETKOVSKI, M. Adaptive low computational cost optimisation method for performance-based seismic design of friction dampers. **Engineering Structures**, 198, p. 109549, 2019/11/01/ 2019.

NAEIM, F.; KELLY, J. M. **Design of seismic isolated structures : from theory to practice**. New York: John Wiley, 1999. 0471149217.

NAKAMINAMI, S.; KIDA, H.; IKAGO, K.; INOUE, N. Dynamic testing of a full-scale hydraulic inerter-damper for the seismic protection of civil structures. 7th International Conference on Advances in Experimental Structural Engineering, AESE 2017. FURINGHETTI, M.;BOLOGNINI, D. e PAVESE, A.: EUCENTRE: 41-54 p. 2017.

NANDA, B.; BISWAL, K. A Review on Applications of Tuned Liquid Dampers in Vibration Control. **Advances in Civil Engineering**, 2014.

NGUYEN, P. T.; PHAM, T. D. The effectiveness of improved tuned liquid column damper on the dynamic response of the structure under earthquake excitations. 2019.

ONTIVEROS-PEREZ, S. P.; MIGUEL, L. F. F. Reliability-based optimum design of multiple tuned mass dampers for minimization of the probability of failure of buildings under earthquakes. **Structures**, 42, p. 144-159, Aug 2022.

OVIEDO, J. A.; DUQUE, M. D. P. Sistemas de control de respuesta sísmica en edificaciones. **Revista EIA**, n. 6, p. 105-120, 2006.

PALACIOS-QUIÑONERO, F.; RUBIÓ-MASSEGUÉ, J.; ROSSELL, J. M.; KARIMI, H. R. Advanced computational design of shared tuned mass-inerter dampers for vibration control of adjacent multi-story structures**Partially supported by the Spanish Ministry of Economy and Competitiveness under Grant DPI2015-64170-R/FEDER. **IFAC-PapersOnLine**, 50, n. 1, p. 13366-13371, 2017/07/01/ 2017.

PALACIOS-QUIÑONERO, F.; RUBIÓ-MASSEGUÉ, J.; ROSSELL, J. M.; KARIMI, H. R. Design of inerter-based multi-actuator systems for vibration control of adjacent structures. **Journal of the Franklin Institute**, 356, n. 14, p. 7785-7809, 2019/09/01/ 2019.

PALERMO, M.; SILVESTRI, S.; GASPARINI, G.; DIB, A.; TROMBETTI, T. A direct design procedure for frame structures with added viscous dampers for the mitigation of earthquake-induced vibrations. **Procedia Engineering**, 199, p. 1755-1760, 2017/01/01/ 2017.

PALL, A. S.; MARSH, C.; FAZIO, P. Friction joints for seismic control of large panel structures. **Journal of Prestressed Concrete Institute**, 25, n. 6, p. 38-61, 1980.

PALOMERA-ARIAS, R.; CONNOR, J. J.; OCHSENDORF, J. A. Feasibility Study of Passive Electromagnetic Damping Systems. **Journal of Structural Engineering**, 134, n. 1, p. 164-170, 2008.

PAN, Y.; GUO, S. J.; JIANG, R. J.; XU, Y. *et al.*, 2018, Atlanta, GA. **Performance evaluation of train suspension energy harvesting shock absorber on railway vehicle dynamics**. 2018. Disponível em: <Go to ISI>://WOS:000461127400077.

PAPAGEORGIU, C.; HOUGHTON, N. E.; SMITH, M. C. Experimental Testing and Analysis of Inerter Devices. **Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control**, 131, n. 1, 2008.

PAPAGEORGIU, C.; HOUGHTON, N. E.; SMITH, M. C. Experimental Testing and Analysis of Inerter Devices. **Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control**, 131, n. 1, 2009.

PAPAGEORGIU, C.; SMITH, M. C., 2005, **Laboratory experimental testing of inerters**. 3351-3356.

PAPAGEORGIU, C.; SMITH, M. C. Positive real synthesis using matrix inequalities for mechanical networks: application to vehicle suspension. **IEEE Transactions on Control Systems Technology**, 14, n. 3, p. 423-435, 2006.

PARK, K.-S.; OK, S.-Y. Coupling ATMD System for Seismic Response Control of Two Adjacent Buildings. **Shock and Vibration**, 2019, p. 2060623, 2019/04/22 2019.

PARULEKAR, Y. M.; REDDY, G. R. Passive Response Control Systems For Seismic Response Reduction: A State-of-the-art Review. **International Journal of Structural Stability and Dynamics**, 09, n. 01, p. 151-177, 2009.

PASTOR, M.; BINDA, M.; HARČARIK, T. Modal Assurance Criterion. **Procedia Engineering**, 48, p. 543-548, 2012/01/01/ 2012.

PATEL, C. C. Seismic analysis of parallel structures coupled by lead extrusion dampers. **International Journal of Advanced Structural Engineering**, 9, n. 2, p. 177-190, 2017/06/01 2017.

PATEL, C. C. Nonlinear damper interconnecting adjoining similar structures subjected to random excitation. **Innovative Infrastructure Solutions**, 8, n. 1, Jan 2023.

PEER, P. E. E. R. C. PEER Ground Motion Database. 2013.

PEÑA, L. A. P.; DOZ, G.; AVILA, M. S. Numerical and experimental comparative of coupled neighboring buildings. **Rev. IBRACON Estrut. Mater.**, 13, n. 6, p. 16, 2020.

PEÑA, L. P. **Resposta dinâmica de edificações adjacentes acopladas: considerações sobre a interação solo-estrutura**. 2017. -, Ph. D. dissertation, Dep. Eng. Civ., Univ. Brasília, Brasília.

PENG, S. J.; ZHANG, L. Z.; ZHANG, D. G. A unified method for parameter optimization and dynamic characteristics analysis of tuned mass damper inerter. **Journal of Vibration and Control**, 2023 Jan 2023.

PÉREZ, L. A.; AVILA, S.; DOZ, G., 2014, Cham. **Seismic Response Control of Adjacent Buildings Connected by Viscous and Hybrid Dampers**. Springer International Publishing. 433-440.

PIETROSANTI, D.; DE ANGELIS, M.; BASILI, M. Optimal design and performance evaluation of systems with Tuned Mass Damper Inerter (TMDI). 46, n. 8, p. 1367-1388, 2017.

PIETROSANTI, D.; DE ANGELIS, M.; GIARALIS, A. Experimental seismic performance assessment and numerical modelling of nonlinear inerter vibration absorber (IVA)-equipped base isolated structures tested on shaking table. **Earthquake Engineering & Structural Dynamics**, 50, n. 10, p. 2732-2753, 2021.

PIPPI, A.; BERNARDES JÚNIOR, P.; AVILA, S.; DE MORAIS, M.; DOZ, G. Dynamic Response to Different Models of Adjacent Coupled Buildings. **Journal of Vibration Engineering & Technologies**, 8, n. 1, p. 247-256, 2020/02/01 2020.

PIPPI, A. D. S.; AVILA, S. M.; DOZ, G. A review on the use of the inerter device in the structural coupling technique for adjacent building vibration control. **Structures**, 42, p. 480-501, 2022/08/01/ 2022.

PIPPI, A. S. **Resposta dinâmica para diferentes modelos de edificações adjacentes acopladas**. 2018. 83 f. Dissertação (Mestrado) - Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília.

PIPPI, A. S.; AVILA, M. S.; ALMEIDA, A. M.; DOZ, G. Vibration control using the structural coupling technique between adjacent buildings with different control devices. *In: XL Ibero-Latin American Computational Methods in Engineering (XL CILAMCE)*, 2019, Natal. p. 12.

PIPPI, A. S.; AVILA, M. S.; DOZ, G. Coupling technique between adjacent structures for vibration control using inerter element. *In: XLI Ibero-Latin-American Congress on Computational Methods in Engineering*, 2020, Foz do Iguaçu. p. 7. Disponível em: <https://www.cilamce.com.br/arearestrita/apresentacoes/185/8627.pdf>.

PRAKASH, S.; JANGID, R. S. Optimum parameters of tuned mass damper-inerter for damped structure under seismic excitation. **International Journal of Dynamics and Control**, 10, n. 5, p. 1322-1336, 2022/10/01 2022.

QUAN, Y.; ZHAO, W. W.; QIAO, H. S. Improved model for parametric optimization of tuned mass damper-inerter for wind-induced vibration control of high-rise building. **Structures**, 56, Oct 2023.

RADU, A.; LAZAR, I. F.; NEILD, S. A. Performance-based seismic design of tuned inerter dampers. 26, n. 5, p. e2346, 2019.

RAJANA, K.; WANG, Z. X.; GIARALIS, A. Optimal design and assessment of tuned mass damper inerter with nonlinear viscous damper in seismically excited multi-storey buildings. **Bulletin of Earthquake Engineering**, 21, n. 3, p. 1509-1539, Feb 2023.

RAS, A.; BOUMECHRA, N. Seismic energy dissipation study of linear fluid viscous dampers in steel structure design. **Alexandria Engineering Journal**, 55, n. 3, p. 2821-2832, 2016/09/01/ 2016.

REZENDE, F.; BRUNET, O.; VARELA, W. D.; PEREIRA, A.; CARVALHO, E. Evaluation of TMD Performance in Footbridges Using Human Walking Probabilistic Models. **Vibration**, 4, n. 2, p. 323-340, Jun 2021.

ROH, H.; CIMELLARO, G. P.; LOPEZ-GARCIA, D. Seismic Response of Adjacent Steel Structures Connected by Passive Device. **Advances in Structural Engineering**, 14, n. 3, p. 499-517, 2011.

ROSSATO, B. B.; MIGUEL, L. F. F. ROBUST OPTIMUM DESIGN OF TUNED MASS DAMPERS FOR HIGH-RISE BUILDINGS SUBJECT TO WIND-INDUCED VIBRATION. **Numerical Algebra Control and Optimization**, 2021 2021.

ROZAS, L.; BOROSCHEK, R. L.; TAMBURRINO, A.; ROJAS, M. A bidirectional tuned liquid column damper for reducing the seismic response of buildings. **Structural Control and Health Monitoring**, 23, n. 4, p. 621-640, 2016.

RUIZ, R.; TAFLANIDIS, A. A.; GIARALIS, A.; LOPEZ-GARCIA, D. Risk-informed optimization of the tuned mass-damper-inerter (TMDI) for the seismic protection of multi-storey building structures. **Engineering Structures**, 177, p. 836-850, 2018/12/15/ 2018.

RYAN, K. L.; OKAZAKI, T.; CORIA, C. B.; SATO, E.; SASAKI, T. Response of hybrid isolation system during a shake table experiment of a full-scale isolated building. **Earthquake Engineering & Structural Dynamics**, 47, n. 11, p. 2214-2232, 2018.

SAKAI, F., 1989, **Tuned liquid column damper-new type device for suppression of building vibration.**

SAKR, T. A. Vibration control of buildings by using partial floor loads as multiple tuned mass dampers. **HBRC Journal**, 13, n. 2, p. 133-144, 2017/08/01/ 2017.

SARWAR, W.; SARWAR, R. Vibration Control Devices for Building Structures and Installation Approach: A Review. **Civil and Environmental Engineering Reports**, 29, n. 2, p. 74-100, 2019.

SHABBIR, F.; OMENZETTER, P. Particle Swarm Optimization with Sequential Niche Technique for Dynamic Finite Element Model Updating. **Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering**, 30, n. 5, p. 359-375, 2015.

SHARMA, A.; LIMEBEER, D. J. N. Motorcycle suspension design using matrix inequalities and passivity constraints. **Vehicle System Dynamics**, 50, p. 377 - 393, 2012.

SHEN, X.; CAMARA, A.; YE, A. Effects of seismic devices on transverse responses of piers in the Sutong Bridge. **Earthquake Engineering and Engineering Vibration**, 14, n. 4, p. 611-623, 2015/12/01 2015.

SHEN, Y.; CHEN, L.; LIU, Y.; ZHANG, X. Influence of fluid inerter nonlinearities on vehicle suspension performance. **Advances in Mechanical Engineering**, 9, n. 11, p. 1687814017737257, 2017.

SHUM, K. M. Closed form optimal solution of a tuned liquid column damper for suppressing harmonic vibration of structures. **Engineering Structures**, 31, n. 1, p. 84-92, 2009/01/01/ 2009.

SMITH, M. C. Synthesis of mechanical networks: the inerter. **IEEE Transactions on Automatic Control**, 47, n. 10, p. 1648-1662, 2002.

SMITH, M. C. Force-Controlling Mechanical Device. PATENT, U. S. United States: Cambridge University Technical Services, Ltd., Cambridge (GB). US7,316,303B2: 17 p. 2008.

SMITH, M. C. The Inerter: A Retrospective. **Annual Review of Control, Robotics, and Autonomous Systems**, 3, n. 1, p. 361-391, 2020.

SMITH, M. C.; HOUGHTON, N. E.; LONG, P. J. G.; ANTHONY RICHARD GLOVER. Force-Controlling Hydraulic Device. PATENT, U. S. United States: Cambridge Enterprise Limited, Cambridge (GB);

McLaren Racing Limited, Surry (GB). US8,881,876B2: 8 p. 2014.

SMITH, M. C.; HOUGHTON, N. E.; LONG, P. J. G.; GLOVER, A. R. Force-Controlling Hydraulic Device. PATENT, U. S. United States: McLaren Electronics Limited, Surrey (GB); Cambridge Enterprise Limited, Cambridge(GB). US 2012/0199428A1: 7 p. 2012.

SMITH, M. C.; WANG, F.-C. Performance Benefits in Passive Vehicle Suspensions Employing Inerters. **Vehicle System Dynamics**, 42, n. 4, p. 235-257, 2004/12/01 2004.

SONG, J.; BI, K.; XU, K.; HAN, Q.; DU, X. Seismic responses of adjacent bridge structures coupled by tuned inerter damper. **Engineering Structures**, 243, p. 112654, 2021/09/15/ 2021.

SONG, J.; BI, K. M.; MA, R. S.; XU, K.; HAN, Q. Optimum design and performance evaluation of inerter-based dampers for seismic protection of adjacent bridges. **Structures**, 55, p. 1277-1291, Sep 2023. Article.

SOONG, M. F.; RAMLI, R.; SAIFIZUL, A. A.; GOH, K. Y.; LONG, S. X. Investigation of inerter-based suspension systems for heavy vehicles. **Plos One**, 18, n. 1, Jan 2023.

SOONG, T. T.; DARGUSH, G. F. **Passive energy dissipation systems in structural engineering**. 1° ed. New York: Wiley, 1997. 368 p. 9780471968214.

SOTO, M. G.; ADELI, H. Tuned mass dampers. **Archives of Computational Methods in Engineering**, 20, p. 419-431, 2013.

SOTO, M. G.; ADELI, H. Optimum tuning parameters of tuned mass dampers for vibration control of irregular highrise building structures. **Journal of Civil Engineering and Management**, 20, n. 5, p. 609-620, 2014/09/03 2014.

SPENCER JR, B.; NAGARAJAIAH, S. State of the art of structural control. **Journal of structural engineering**, 129, n. 7, p. 845-856, 2003.

SUN, L.; HONG, D.; CHEN, L. Cables interconnected with tuned inerter damper for vibration mitigation. **Engineering Structures**, 151, p. 57-67, 2017/11/15/ 2017.

SUN, X. Q.; CHEN, L.; WANG, S. H.; ZHANG, X. L.; YANG, X. F. Performance investigation of vehicle suspension system with nonlinear ball-screw inerter. **International Journal of Automotive Technology**, 17, n. 3, p. 399-408, 2016/06/01 2016.

SYMANS, M. D.; CHARNEY, F. A.; WHITTAKER, A. S.; CONSTANTINOU, M. C. *et al.* Energy Dissipation Systems for Seismic Applications: Current Practice and Recent Developments. **Journal of Structural Engineering**, 134, n. 1, p. 3-21, 2008.

TIWARI, N. D.; GOGOI, A.; HAZRA, B.; WANG, Q. H. A shape memory alloy-tuned mass damper inerter system for passive control of linked-SDOF structural systems under seismic excitation. **Journal of Sound and Vibration**, 494, Mar 2021.

TSAI, H. C.; LIN, G. C. Optimum tuned-mass dampers for minimizing steady-state response of support-excited and damped systems. **Earthquake engineering & structural dynamics**, 22, n. 11, p. 957-973, 1993.

TSANG, H.-H. Seismic isolation by rubber–soil mixtures for developing countries. **Earthquake Engineering & Structural Dynamics**, 37, n. 2, p. 283-303, 2008.

TSAO, W.-H.; HWANG, W.-S. Tuned liquid dampers with porous media. **Ocean Engineering**, 167, p. 55-64, 2018/11/01/ 2018.

UZ, M. E.; HADI, M. N. S. **Earthquake Resistant Design of Buildings**. 1st Edition ed. Boca Raton: 2017.

- VILLAVERDE, R. Seismic Control of Structures with Damped Resonant Appendages. 1994.
- WAGG, D. J. Some recent developments in inerter-based devices for vibration mitigation. **Bulletin of the Polish Academy of Sciences-Technical Sciences**, 71, n. 3, Jun 2023.
- WANG, A. P.; FUNG, R. F.; HUANG, S. C. Dynamic Analysis of a Tall Building with a Tuned-Mass-Damper Device Subjected to Earthquake Excitations. **Journal of Sound and Vibration**, 244, n. 1, p. 123-136, 2001/06/28/ 2001.
- WANG, F.-C.; HONG, M.-F.; CHEN, C.-W. Building suspensions with inerters. 224, n. 8, p. 1605-1616, 2010.
- WANG, F.-C.; HONG, M.-F.; LIN, T.-C. Designing and testing a hydraulic inerter. **Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science**, 225, n. 1, p. 66-72, 2011.
- WANG, F.-C.; LIAO, M.-K. The lateral stability of train suspension systems employing inerters. **Vehicle System Dynamics**, 48, n. 5, p. 619-643, 2010/05/01 2010.
- WANG, F.-C.; LIAO, M.-K.; LIAO, B.-H.; SU, W.-J.; CHAN, H.-A. The performance improvements of train suspension systems with mechanical networks employing inerters. **Vehicle System Dynamics**, 47, n. 7, p. 805-830, 2009/07/01 2009.
- WANG, F.-C.; SU, W.-J. Impact of inerter nonlinearities on vehicle suspension control. **Vehicle System Dynamics**, 46, n. 7, p. 575-595, 2008/07/01 2008.
- WANG, F.-C.; WU, S.-Y. Vibration control of an optical table employing mechatronic inerter networks. **Journal of Vibration and Control**, 22, n. 1, p. 224-234, 2016.
- WANG, F.; YU, C.; CHANG, M.; HSU, M., 2006, **The Performance Improvements of Train Suspension Systems with Inerters**. 1472-1477.
- WANG, H.; SHEN, W. A.; ZHU, H. P.; KONG, F.; ZHU, S. Y. Stochastic seismic analysis of base-isolated structures with electromagnetic inertial mass dampers considering different soil conditions. **Bulletin of Earthquake Engineering**, 21, n. 3, p. 1601-1626, Feb 2023.
- WANG, H.; SHEN, W. A.; ZHU, H. P.; LUO, H. Stochastic Optimization of a Nonlinear Base Isolation System with LRB and EIMD for Building Structures. **Structural Control & Health Monitoring**, 2023, Feb 2023.
- WANG, Q.; QIAO, H.; DE DOMENICO, D.; ZHU, Z.; TANG, Y. Seismic response control of adjacent high-rise buildings linked by the Tuned Liquid Column Damper-Inerter (TLCDI). **Engineering Structures**, 223, p. 111169, 2020/11/15/ 2020.

WANG, Q. H.; QIAO, H. S.; DE DOMENICO, D.; ZHU, Z. W.; TANG, Y. Seismic performance of optimal Multi-Tuned Liquid Column Damper-Inerter (MTLCDI) applied to adjacent high-rise buildings. **Soil Dynamics and Earthquake Engineering**, 143, Apr 2021.

WANG, Q. H.; TIWARI, N. D.; HAZRA, B.; LEI, W.; ZHU, Z. W. MTMDI for Mitigating Wind -Induced Responses of Linked High-Rise Buildings. **Journal of Structural Engineering**, 147, n. 4, Apr 2021.

WANG, Y.; LI, H. X.; MENG, H. D. Dynamic characteristics of underframe semi-active inerter-based suspended device for high-speed train based on LQR control. **Bulletin of the Polish Academy of Sciences-Technical Sciences**, 70, n. 4, Aug 2022.

WARBURTON, G. B. Optimum absorber parameters for various combinations of response and excitation parameters. **Earthquake Engineering & Structural Dynamics**, 10, n. 3, p. 381-401, 1982.

WEN, Y. K.; CHEN, Z. Q.; HUA, X. G. Design and Evaluation of Tuned Inerter-Based Dampers for the Seismic Control of MDOF Structures. **Journal of Structural Engineering**, 143, n. 4, Apr 2017.

WEN, Y. K.; GOMEZ, F.; LI, D. X.; SPENCER, B. F. Generalized optimal design of multiple tuned inerter dampers for control of MDOF structures under stochastic seismic excitation. **Structural Control & Health Monitoring**, 29, n. 1, Jan 2022.

WEN, Y. K.; HUI, B. Stochastic Optimization of Multiple Tuned Inerter Dampers for Mitigating Seismic Responses of Bridges with Friction Pendulum Systems. **International Journal of Structural Stability and Dynamics**, 22, n. 13, Oct 2022.

WESTERMO, B. D. The dynamics of interstructural connection to prevent pounding. **Earthquake Engineering & Structural Dynamics**, 18, n. 5, p. 687-699, 1989a.

WESTERMO, B. D. The dynamics of interstructural connection to prevent pounding. 18, n. 5, p. 687-699, 1989b.

WON, A. Y. J.; PIRES, J. A.; HAROUN, M. A. Performance assessment of tuned liquid column dampers under random seismic loading. **International Journal of Non-Linear Mechanics**, 32, n. 4, p. 745-758, 1997/07/01/ 1997.

WONG, K. K. F.; HARRIS, J. L. Seismic damage and fragility analysis of structures with tuned mass dampers based on plastic energy. **The Structural Design of Tall and Special Buildings**, 21, n. 4, p. 296-310, 2012.

WU, H.; WANG, Q.; TIWARI, N. D.; DE DOMENICO, D. Comparison of Dynamic Responses of Parallel-Placed Adjacent High-Rise Buildings under Wind and Earthquake Excitations. **Shock and Vibration**, 2021, p. 6644158, 2021/06/28 2021.

XIAO, C. Z.; WU, Z. H.; CHEN, K.; TANG, Y.; YAN, Y. L. Development of a Water Supplement System for a Tuned Liquid Damper under Excitation. **Buildings**, 13, n. 5, Apr 2023.

XU, Y. L.; HE, Q.; KO, J. M. Dynamic response of damper-connected adjacent buildings under earthquake excitation. **Engineering Structures**, 21, n. 2, p. 135-148, 1999/02/01/ 1999.

XU, Y. L.; KWOK, K. C. S.; SAMALI, B. The effect of tuned mass dampers and liquid dampers on cross-wind response of tall/slender structures. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, 40, n. 1, p. 33-54, 1992/04/01/ 1992.

YANG, C.; XIE, L.; LI, A.; JIA, J.; ZENG, D. Ground motion intensity measures for seismically isolated RC tall buildings. **Soil Dynamics and Earthquake Engineering**, 125, p. 105727, 2019/10/01/ 2019.

YANG, X. J.; LEI, Y.; WANG, J. J.; ZHU, H. P.; SHEN, W. A. Physics-enhanced machine learning-based optimization of tuned mass damper parameters for seismically-excited buildings. **Engineering Structures**, 292, Oct 2023.

YANG, Z.; XU, Y. L.; LU, X. L. Experimental Seismic Study of Adjacent Buildings with Fluid Dampers. **Journal of Structural Engineering**, 129, n. 2, p. 197-205, 2003.

YANIK, A.; ALDEMIR, U. A Short Review on the Active Control Approaches in Earthquake Engineering at the Last 10 Years (2008-2018). **International Journal of Engineering and Technology**, 11, n. 2, p. 8, 2019.

ZHANG, R.; ZHAO, Z.; PAN, C.; IKAGO, K.; XUE, S. Damping enhancement principle of inerter system. **Structural Control and Health Monitoring**, 27, n. 5, p. e2523, 2020/05/01 2020. <https://doi.org/10.1002/stc.2523>.

ZHANG, R. Y.; HUANG, J. Z.; CAO, M. G.; LUO, Q. Y.; GUO, X. W. Study on Parameters' Influence and Optimal Design of Tuned Inerter Dampers for Seismic Response Mitigation. **Buildings**, 12, n. 5, May 2022.

ZHANG, S.; LI, S.; LIU, L.; TANG, X.; ZHANG, C. Dynamic response analysis of three adjacent structure control systems under earthquake. **Journal of Vibration and Shock**, 42, n. 8, p. 177-185, 2023-04-28 2023.

ZHANG, S.; TANG, X.; LIU, L.; LV, H.; LI, S. Seismic performance analysis of adjacent eccentric structures based on PSO algorithm. **Structures**, 50, p. 39-51, 2023/04/01/ 2023.

ZHANG, S. R.; HE, J. M.; LIU, L. K.; LI, S. H.; TAN, P. Energy research of three-adjacent structures connected by Kelvin-type dampers based on power flow. **Structures**, 51, p. 1670-1683, May 2023.

ZHANG, X. X.; LI, H.; CHENG, J.; SHENG, L. J.; YAO, Y. Adaptive stability mechanism of high-speed train employing parallel inerter yaw damper. **Vehicle System Dynamics**, 61, n. 1, p. 38-57, Jan 2023.

ZHANG, Y.; HU, N. Q.; CHENG, Z.; ZHANG, L.; CHEN, H. P., 2018, Chongqing, PEOPLES R CHINA. **Dynamic Modeling of the Aircraft Landing Gear Based on ISD Mechanism**. 2018. 344-349. Disponível em: <Go to ISI>://WOS:000459864800058.

ZHANG, Y. L.; XU, W. Z.; DU, D. S.; WANG, S. G. Stochastic Optimization of Dissipation Structures Based on Lyapunov Differential Equations and the Full Stress Design Method. **Buildings**, 13, n. 3, Mar 2023.

ZHAO, Z.; CHEN, Q.; ZHANG, R.; JIANG, Y.; XIA, Y. Interaction of Two Adjacent Structures Coupled by Inerter-based System considering Soil Conditions. **Journal of Earthquake Engineering**, p. 1-21, 2020.

ZHAO, Z.; CHEN, Q.; ZHANG, R.; PAN, C.; JIANG, Y. Optimal design of an inerter isolation system considering the soil condition. **Engineering Structures**, 196, p. 109324, 2019/10/01/ 2019.

ZUO, H.; BI, K.; HAO, H.; MA, R. Influences of ground motion parameters and structural damping on the optimum design of inerter-based tuned mass dampers. **Engineering Structures**, 227, p. 111422, 2021/01/15/ 2021.

ANEXO A

Quadro A.1 – Registros sísmicos aplicados nas análises numéricas.

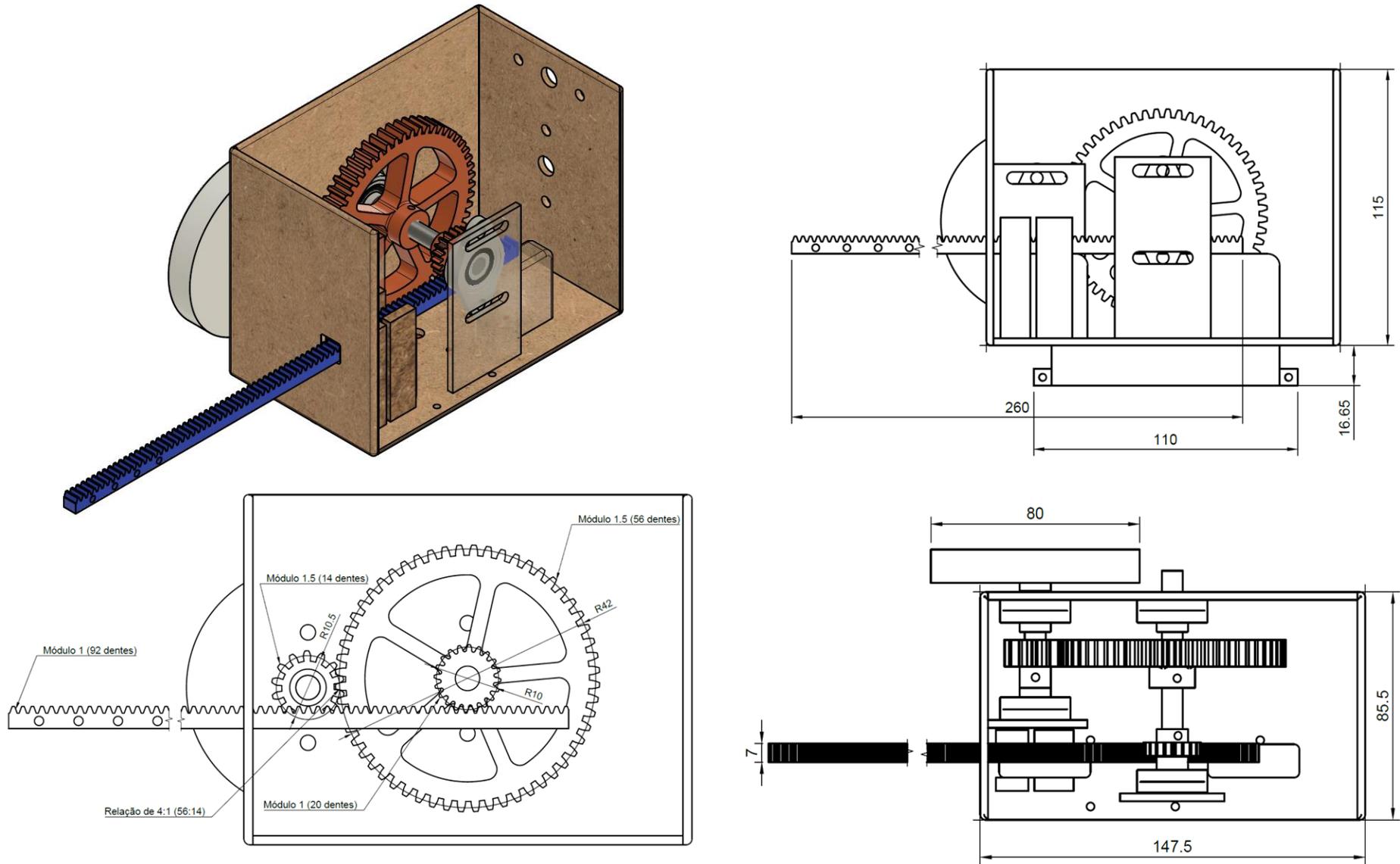
Nº	Registro	Identificação	Ano	Mag.	Componente 1	Componente 2	PGA(g)	PGV (cm/s)
1	181	Imperial Valley-06	1979	6.5	IMPVALL/H-E06_233	IMPVALL/H-E06_323	0.4	111.9
2	182	Imperial Valley-07	1979	6.5	IMPVALL/H-E07_233	IMPVALL/H-E07_323	0.5	108.9
3	292	Irpinia, Italy-01	1980	6.9	ITALY/A-STU_223	ITALY/A-STU_313	0.3	45.5
4	723	Superstition Hills-02	1987	6.5	SUPERST/B-PTS_037	SUPERST/B-PTS_127	0.4	106.8
5	802	Loma Prieta	1989	6.9	LOMAP/STG_038	LOMAP/STG_128	0.4	55.6
6	821	Erzican, Turkey	1992	6.7	ERZIKAN/ERZ_032	ERZIKAN/ERZ_122	0.5	95.5
7	828	Cape Mendocino	1992	7	CAPEMEND/PET_260	CAPEMEND/PET_350	0.6	82.1
8	879	Landers	1992	7.3	LANDERS/LCN_239	LANDERS/LCN_329	0.8	140.3
9	1063	Northridge-01	1994	6.7	NORTHR/RRS_032	NORTHR/RRS_122	0.9	167.3
10	1086	Northridge-01	1994	6.7	NORTHR/SYL_032	NORTHR/SYL_122	0.7	122.8
11	1165	Kocaeli, Turkey	1999	7.5	KOCAELI/IZT_180	KOCAELI/IZT_270	0.2	29.8
12	1503	Chi-Chi, Taiwan	1999	7.6	CHICHI/TCU065_272	CHICHI/TCU065_002	0.8	127.7
13	1529	Chi-Chi, Taiwan	1999	7.6	CHICHI/TCU102_278	CHICHI/TCU102_008	0.3	106.6
14	1605	Duzce, Turkey	1999	7.1	DUZCE/DZC_172	DUZCE/DZC_262	0.5	79.3
15	126	Gazli, USSR	1976	6.8	GAZLI/GAZ_177	GAZLI/GAZ_267	0.71	71.2
16	160	Imperial Valley-06	1979	6.5	IMPVALL/H-BCR_233	IMPVALL/H-BCR_323	0.76	44.3
17	165	Imperial Valley-06	1979	6.5	IMPVALL/H-CHI_233	IMPVALL/H-CHI_323	0.28	30.5
18	495	Nahanni, Canada	1985	6.8	NAHANNI/S1_070	NAHANNI/S1_160	1.18	43.9
19	496	Nahanni, Canada	1985	6.8	NAHANNI/S2_070	NAHANNI/S2_160	0.45	34.7
20	741	Loma Prieta	1989	6.9	LOMAP/BRN_038	LOMAP/BRN_128	0.64	55.9
21	753	Loma Prieta	1989	6.9	LOMAP/BRN_038	LOMAP/CLS_128	0.51	45.5
22	825	Cape Mendocino	1992	7	CAPEMEND/CPM_260	CAPEMEND/CPM_350	1.43	119.5
23	1004	Northridge-01	1994	6.7	NORTHR/0637_032	NORTHR/0637_122	0.73	70.1
24	1048	Northridge-01	1994	6.7	NORTHR/STC_032	NORTHR/STC_122	0.42	53.2

25	1176	Kocaeli, Turkey	1999	7.5	KOCAELI/YPT_180	KOCAELI/YPT_270	0.31	73
26	1504	Chi-Chi, Taiwan	1999	7.6	CHICHI/TCU067_285	CHICHI/TCU067_015	0.56	91.8
27	1517	Chi-Chi, Taiwan	1999	7.6	CHICHI/TCU084_271	CHICHI/TCU084_001	1.16	115.1
28	2114	Denali, Alaska	2002	7.9	DENALI/ps10_199	DENALI/ps10_289	0.33	126.4
29	68	San Fernando	1971	6.6	SFERN/PEL090	SFERN/PEL0180	0.21	19
30	125	Friuli, Italy	1976	6.5	FRIULI/A-TMZ000	FRIULI/A-TMZ270	0.35	31
31	169	Imperial Valley	1979	6.5	IMPVALL/H-DLT262	IMPVALL/H-DLT352	0.35	33
32	174	Imperial Valley	1979	6.5	IMPVALL/H-E11140	IMPVALL/H-E11230	0.38	42
33	721	Superstition Hills	1987	6.5	SUPERST/B-ICC000	SUPERST/B-ICC090	0.36	46
34	725	Superstition Hills	1987	6.5	SUPERST/B-POE270	SUPERST/B-POE360	0.45	36
35	752	Loma Prieta	1989	6.9	LOMAP/CAP000	LOMAP/CAP090	0.53	35
36	767	Loma Prieta	1989	6.9	LOMAP/G03000	LOMAP/G03090	0.56	45
37	1633	Manjil, Iran	1990	7.4	MANJIL/ABBAR-L	MANJIL/ABBAR-T	0.51	54
38	900	Landers	1992	7.3	LANDERS/YER270	LANDERS/YER360	0.24	52
39	848	Landers	1992	7.3	LANDERS/CLW-LN	LANDERS/CLW-TR	0.42	42
40	829	Cape Mendocino	1992	7	CAPEMEND/RIO270	CAPEMEND/RIO360	0.55	44
41	953	Northridge	1994	6.7	NORTHR/MUL009	FRIULI/A-TMZ270	0.52	63
42	960	Northridge	1994	6.7	NORTHR/LOS000	NORTHR/LOS270	0.48	45
43	1111	Kobe, Japan	1995	6.9	KOBE/NIS000	KOBE/NIS090	0.51	37
44	1116	Kobe, Japan	1995	6.9	KOBE/SHI000	KOBE/SHI090	0.24	38
45	1602	Duzce, Turkey	1999	7.1	DUZCE/BOL000	DUZCE/BOL090	0.82	62
46	1787	Hector Mine	1999	7.1	HECTOR/HEC000	HECTOR/HEC090	0.34	42
47	1158	Kocaeli, Turkey	1999	7.5	KOCAELI/DZC180	KOCAELI/DZC270	0.36	59
48	1148	Kocaeli, Turkey	1999	7.5	KOCAELI/ARC000	KOCAELI/ARC090	0.22	40
49	1244	Chi-Chi, Taiwan	1999	7.6	CHICHI/CHY101-E	CHICHI/CHY101-N	0.44	115
50	1485	Chi-Chi, Taiwan	1999	7.6	CHICHI/TCU045-E	CHICHI/TCU045-N	0.51	39

Fonte: PEER.

APÊNDICE A

Figura A.1 – Detalhes do dispositivo *inertor* construído.



Quadro Ap.1 – Resultados da otimização VD – Caso 1.

DRP								ENG								ACL							
Análise	c (Ns/m)	k (N/m)	b (kg)	f _{obj}	t (s)	d1 (m)	d2 (m)	c (Ns/m)	k (N/m)	b (kg)	f _{obj}	t (s)	d1 (m)	d2 (m)	c (Ns/m)	k (N/m)	b (kg)	f _{obj}	t (s)	d1 (m)	d2 (m)		
1	6,54E+05	0	0	0,000167	2,661	0,00825	0,00355	5,69E+05	0	0	1,24E+03	7,520	0,00683	0,00425	3,52E+05	0	0	3,160127	4,713	0,00765	0,00373		
2	6,53E+05	0	0	0,000167	2,063	0,00783	0,00583	5,69E+05	0	0	1,24E+03	7,447	0,00683	0,00425	3,52E+05	0	0	3,160126	4,186	0,00765	0,00373		
3	6,54E+05	0	0	0,000167	2,139	0,00673	0,00481	5,68E+05	0	0	1,24E+03	7,410	0,00683	0,00425	3,52E+05	0	0	3,160123	5,137	0,00765	0,00373		
4	6,54E+05	0	0	0,000167	2,059	0,00954	0,00705	5,69E+05	0	0	1,24E+03	7,047	0,00683	0,00425	3,52E+05	0	0	3,160120	5,590	0,00765	0,00373		
5	6,54E+05	0	0	0,000167	2,170	0,00666	0,00447	5,69E+05	0	0	1,24E+03	6,157	0,00683	0,00425	3,52E+05	0	0	3,160121	4,153	0,00765	0,00373		
6	6,54E+05	0	0	0,000167	2,055	0,00659	0,00459	5,69E+05	0	0	1,24E+03	6,822	0,00683	0,00425	3,52E+05	0	0	3,160121	3,302	0,00769	0,00372		
7	6,54E+05	0	0	0,000167	2,116	0,00670	0,00478	5,68E+05	0	0	1,24E+03	5,379	0,00683	0,00425	3,52E+05	0	0	3,160123	4,004	0,00765	0,00373		
8	6,54E+05	0	0	0,000167	2,025	0,00665	0,00471	5,68E+05	0	0	1,24E+03	6,866	0,00683	0,00425	3,52E+05	0	0	3,160124	4,038	0,00765	0,00373		
9	6,54E+05	0	0	0,000167	2,099	0,00909	0,00346	5,68E+05	0	0	1,24E+03	6,399	0,00683	0,00425	3,52E+05	0	0	3,160121	4,315	0,00765	0,00373		
10	6,54E+05	0	0	0,000167	2,168	0,00895	0,00664	5,69E+05	0	0	1,24E+03	6,903	0,00683	0,00425	3,52E+05	0	0	3,160122	3,509	0,00765	0,00373		
11	6,54E+05	0	0	0,000167	2,211	0,00667	0,00444	5,68E+05	0	0	1,24E+03	5,323	0,00683	0,00425	3,52E+05	0	0	3,160121	4,266	0,00765	0,00373		
12	6,53E+05	0	0	0,000167	2,194	0,00676	0,00432	5,69E+05	0	0	1,24E+03	5,826	0,00683	0,00425	3,52E+05	0	0	3,160125	4,403	0,00765	0,00373		
13	6,54E+05	0	0	0,000167	2,358	0,00658	0,00462	5,68E+05	0	0	1,24E+03	7,058	0,00683	0,00425	3,52E+05	0	0	3,160124	6,963	0,00765	0,00373		
14	6,54E+05	0	0	0,000167	2,098	0,00988	0,00349	5,69E+05	0	0	1,24E+03	6,973	0,00683	0,00425	3,52E+05	0	0	3,160122	6,349	0,00765	0,00373		
15	6,54E+05	0	0	0,000167	2,143	0,00676	0,00432	5,68E+05	0	0	1,24E+03	5,640	0,00683	0,00425	3,52E+05	0	0	3,160124	7,017	0,00765	0,00373		
16	6,53E+05	0	0	0,000167	2,181	0,00661	0,00454	5,69E+05	0	0	1,24E+03	7,533	0,00683	0,00425	3,52E+05	0	0	3,160122	4,643	0,00765	0,00373		
17	6,54E+05	0	0	0,000167	2,096	0,00730	0,00539	5,69E+05	0	0	1,24E+03	7,387	0,00683	0,00425	3,52E+05	0	0	3,160125	3,076	0,00742	0,00383		
18	6,54E+05	0	0	0,000167	2,071	0,00904	0,00671	5,68E+05	0	0	1,24E+03	8,192	0,00683	0,00425	3,52E+05	0	0	3,160125	5,350	0,00765	0,00373		
19	6,54E+05	0	0	0,000167	2,108	0,00863	0,00642	5,68E+05	0	0	1,24E+03	6,506	0,00683	0,00425	3,52E+05	0	0	3,160122	4,328	0,00765	0,00373		
20	6,54E+05	0	0	0,000167	2,103	0,00673	0,00437	5,68E+05	0	0	1,24E+03	7,658	0,00683	0,00425	3,52E+05	0	0	3,160123	5,367	0,00765	0,00373		
21	6,54E+05	0	0	0,000167	2,257	0,00742	0,00383	5,69E+05	0	0	1,24E+03	7,883	0,00683	0,00425	3,52E+05	0	0	3,160121	6,235	0,00765	0,00373		
22	6,53E+05	0	0	0,000167	2,286	0,00697	0,00509	5,69E+05	0	0	1,24E+03	8,579	0,00683	0,00425	3,52E+05	0	0	3,160120	6,212	0,00765	0,00373		
23	6,54E+05	0	0	0,000167	2,083	0,00715	0,00398	5,68E+05	0	0	1,24E+03	7,139	0,00683	0,00425	3,52E+05	0	0	3,160122	4,368	0,00765	0,00373		
24	6,54E+05	0	0	0,000167	2,093	0,00689	0,00500	5,68E+05	0	0	1,24E+03	7,594	0,00683	0,00425	3,52E+05	0	0	3,160120	6,373	0,00765	0,00373		
25	6,55E+05	0	0	0,000167	2,086	0,00670	0,00441	5,69E+05	0	0	1,24E+03	7,908	0,00683	0,00425	3,52E+05	0	0	3,160120	6,321	0,00765	0,00373		
26	6,55E+05	0	0	0,000167	2,235	0,00663	0,00469	5,69E+05	0	0	1,24E+03	7,471	0,00683	0,00425	3,52E+05	0	0	3,160124	3,478	0,00765	0,00373		
27	6,54E+05	0	0	0,000167	2,040	0,00677	0,00431	5,68E+05	0	0	1,24E+03	5,775	0,00683	0,00425	3,52E+05	0	0	3,160120	5,746	0,00765	0,00373		
28	6,54E+05	0	0	0,000167	2,299	0,00667	0,00445	5,68E+05	0	0	1,24E+03	6,469	0,00683	0,00425	3,52E+05	0	0	3,160125	3,658	0,00766	0,00373		
29	6,54E+05	0	0	0,000167	2,165	0,00927	0,00687	5,69E+05	0	0	1,24E+03	7,130	0,00683	0,00425	3,52E+05	0	0	3,160121	3,806	0,00765	0,00373		
30	6,54E+05	0	0	0,000167	2,060	0,00663	0,00469	5,69E+05	0	0	1,24E+03	7,020	0,00683	0,00425	3,52E+05	0	0	3,160125	4,465	0,00765	0,00373		
Média	6,54E+05	0	0	0,000167	2,16	0,0074	0,0049	5,69E+05	0	0	1,24E+03	6,97	0,0068	0,0042	3,52E+05	0	0	3,160	4,85	0,0076	0,0037		
Desvio Padrão	3,88E+02	0	0	3,11E-10	1,26E-01	1,07E-03	9,94E-04	1,49E+02	0	0	2,48E-03	8,19E-01	3,28E-07	3,44E-07	3,61E+01	0	0	1,99E-06	1,13E+00	4,24E-05	1,85E-05		
Coef. de Variação	0,06%	0	0	0,00%	5,85%	14,5%	20,5%	0,03%	0	0	0,00%	11,8%	0,00%	0,01%	0,01%	0	0	0,00%	23,4%	0,56%	0,50%		

Quadro Ap.2 – Resultados da otimização VDI – Caso 1.

DRP								ENG							ACL						
Análise	c (Ns/m)	k (N/m)	b (kg)	f _{obj}	t (s)	d1 (m)	d2 (m)	c (Ns/m)	k (N/m)	b (kg)	f _{obj}	t (s)	d1 (m)	d2 (m)	c (Ns/m)	k (N/m)	b (kg)	f _{obj}	t (s)	d1 (m)	d2 (m)
1	4,58E+05	0	4,58E+04	0,000128	3,715	0,00563	0,00563	4,30E+05	0	3,78E+04	1,02E+03	5,720	0,00592	0,00525	3,19E+05	0	1,19E+04	3,013566	5,297	0,00738	0,00390
2	4,58E+05	0	4,58E+04	0,000128	3,482	0,00563	0,00563	4,30E+05	0	3,78E+04	1,02E+03	5,160	0,00592	0,00525	3,19E+05	0	1,19E+04	3,013566	5,045	0,00738	0,00390
3	4,59E+05	0	4,57E+04	0,000128	2,703	0,00563	0,00564	4,30E+05	0	3,78E+04	1,02E+03	4,973	0,00592	0,00525	3,19E+05	0	1,19E+04	3,013566	4,438	0,00738	0,00390
4	4,62E+05	0	4,57E+04	0,000128	2,285	0,00544	0,00577	4,30E+05	0	3,78E+04	1,02E+03	5,202	0,00592	0,00525	3,19E+05	0	1,19E+04	3,013566	4,790	0,00738	0,00390
5	4,59E+05	0	4,58E+04	0,000128	3,270	0,00563	0,00564	4,30E+05	0	3,78E+04	1,02E+03	5,424	0,00592	0,00525	3,19E+05	0	1,19E+04	3,013566	5,013	0,00738	0,00390
6	4,59E+05	0	4,58E+04	0,000128	3,188	0,00563	0,00563	4,30E+05	0	3,78E+04	1,02E+03	5,692	0,00592	0,00525	3,19E+05	0	1,19E+04	3,013566	5,106	0,00738	0,00390
7	4,59E+05	0	4,58E+04	0,000128	3,382	0,00563	0,00563	4,30E+05	0	3,78E+04	1,02E+03	5,306	0,00592	0,00525	3,19E+05	0	1,19E+04	3,013566	5,274	0,00738	0,00390
8	4,59E+05	0	4,58E+04	0,000128	3,234	0,00563	0,00563	4,30E+05	0	3,78E+04	1,02E+03	5,750	0,00592	0,00525	3,19E+05	0	1,19E+04	3,013566	5,034	0,00738	0,00390
9	4,58E+05	0	4,57E+04	0,000128	2,821	0,00564	0,00563	4,30E+05	0	3,78E+04	1,02E+03	5,690	0,00592	0,00525	3,19E+05	0	1,19E+04	3,013566	5,294	0,00738	0,00390
10	4,59E+05	0	4,58E+04	0,000128	3,011	0,00563	0,00563	4,30E+05	0	3,78E+04	1,02E+03	5,363	0,00592	0,00525	3,19E+05	0	1,19E+04	3,013566	5,926	0,00738	0,00390
11	4,59E+05	0	4,58E+04	0,000128	3,365	0,00563	0,00563	4,30E+05	0	3,78E+04	1,02E+03	5,206	0,00592	0,00525	3,19E+05	0	1,19E+04	3,013566	5,297	0,00738	0,00390
12	4,58E+05	0	4,57E+04	0,000128	2,786	0,00585	0,00550	4,30E+05	0	3,78E+04	1,02E+03	5,772	0,00592	0,00525	3,19E+05	0	1,19E+04	3,013566	5,045	0,00738	0,00390
13	4,59E+05	0	4,58E+04	0,000128	3,147	0,00563	0,00563	4,30E+05	0	3,78E+04	1,02E+03	7,685	0,00592	0,00525	3,19E+05	0	1,19E+04	3,013566	4,438	0,00738	0,00390
14	4,58E+05	0	4,58E+04	0,000128	3,219	0,00563	0,00563	4,30E+05	0	3,78E+04	1,02E+03	5,779	0,00592	0,00525	3,19E+05	0	1,19E+04	3,013566	4,790	0,00738	0,00390
15	4,59E+05	0	4,58E+04	0,000128	3,009	0,00561	0,00566	4,30E+05	0	3,78E+04	1,02E+03	6,580	0,00592	0,00525	3,19E+05	0	1,19E+04	3,013566	5,013	0,00738	0,00390
16	4,59E+05	0	4,58E+04	0,000128	3,324	0,00563	0,00563	4,30E+05	0	3,78E+04	1,02E+03	5,504	0,00592	0,00525	3,19E+05	0	1,19E+04	3,013566	5,106	0,00738	0,00390
17	4,59E+05	0	4,58E+04	0,000128	3,460	0,00563	0,00563	4,30E+05	0	3,78E+04	1,02E+03	5,453	0,00592	0,00525	3,19E+05	0	1,19E+04	3,013566	5,274	0,00738	0,00390
18	4,57E+05	0	4,57E+04	0,000128	2,513	0,00587	0,00534	4,30E+05	0	3,78E+04	1,02E+03	5,431	0,00592	0,00525	3,19E+05	0	1,19E+04	3,013566	5,034	0,00738	0,00390
19	4,59E+05	0	4,58E+04	0,000128	3,205	0,00563	0,00563	4,30E+05	0	3,78E+04	1,02E+03	5,728	0,00592	0,00525	3,19E+05	0	1,19E+04	3,013566	5,294	0,00738	0,00390
20	4,59E+05	0	4,58E+04	0,000128	3,521	0,00563	0,00563	4,30E+05	0	3,78E+04	1,02E+03	5,285	0,00592	0,00525	3,19E+05	0	1,19E+04	3,013566	5,926	0,00738	0,00390
21	4,58E+05	0	4,58E+04	0,000128	3,211	0,00563	0,00563	4,30E+05	0	3,78E+04	1,02E+03	5,244	0,00592	0,00525	3,19E+05	0	1,19E+04	3,013566	5,297	0,00738	0,00390
22	4,59E+05	0	4,57E+04	0,000128	2,668	0,00561	0,00567	4,30E+05	0	3,78E+04	1,02E+03	5,383	0,00592	0,00525	3,19E+05	0	1,19E+04	3,013566	5,045	0,00738	0,00390
23	4,58E+05	0	4,57E+04	0,000128	2,406	0,00715	0,00977	4,30E+05	0	3,78E+04	1,02E+03	5,834	0,00592	0,00525	3,19E+05	0	1,19E+04	3,013566	4,438	0,00738	0,00390
24	4,59E+05	0	4,58E+04	0,000128	3,035	0,00564	0,00561	4,30E+05	0	3,78E+04	1,02E+03	5,794	0,00592	0,00525	3,19E+05	0	1,19E+04	3,013566	4,790	0,00738	0,00390
25	4,59E+05	0	4,58E+04	0,000128	3,383	0,00563	0,00563	4,30E+05	0	3,78E+04	1,02E+03	5,046	0,00592	0,00525	3,19E+05	0	1,19E+04	3,013566	5,013	0,00738	0,00390
26	4,59E+05	0	4,56E+04	0,000128	2,490	0,00593	0,00526	4,30E+05	0	3,78E+04	1,02E+03	5,519	0,00592	0,00525	3,19E+05	0	1,19E+04	3,013566	5,106	0,00738	0,00390
27	4,59E+05	0	4,58E+04	0,000128	2,848	0,00565	0,00565	4,30E+05	0	3,78E+04	1,02E+03	4,892	0,00592	0,00525	3,19E+05	0	1,19E+04	3,013566	5,274	0,00738	0,00390
28	4,59E+05	0	4,58E+04	0,000128	3,207	0,00563	0,00563	4,30E+05	0	3,78E+04	1,02E+03	5,493	0,00592	0,00525	3,19E+05	0	1,19E+04	3,013566	5,034	0,00738	0,00390
29	4,59E+05	0	4,58E+04	0,000128	3,186	0,00563	0,00563	4,30E+05	0	3,78E+04	1,02E+03	5,596	0,00592	0,00525	3,19E+05	0	1,19E+04	3,013566	5,294	0,00738	0,00390
30	4,59E+05	0	4,58E+04	0,000128	2,912	0,00563	0,00563	4,30E+05	0	3,78E+04	1,02E+03	5,416	0,00592	0,00525	3,19E+05	0	1,19E+04	3,013566	5,926	0,00738	0,00390
Média	4,59E+05	0	4,57E+04	0,000128	3,07	0,0057	0,0057	4,30E+05	0	3,78E+04	1,02E+03	5,56	0,0059	0,0053	3,19E+05	0	1,19E+04	3,014	5,122	0,0074	0,0039
Desvio Padrão	7,41E+02	0	3,32E+01	1,13E-09	3,57E-01	2,88E-04	7,66E-04	1,13E-02	0	1,22E-03	5,09E-12	5,17E-01	4,35E-11	7,04E-11	1,56E-02	0	1,98E-03	8,97E-09	3,71E-01	2,46E-07	8,82E-08
Coef. de Variação	0,16%	0	0,07%	0,00%	11,6%	5,06%	13,3%	0,00%	0	0,00%	0,00%	9,30%	0,00%	0,00%	0,00%	0	0,00%	0,00%	7,25%	0,00%	0,00%

Quadro Ap.3 – Resultados da otimização AIS – Caso 1.

DRP								ENG								ACL							
Análise	c (Ns/m)	k (N/m)	b (kg)	f _{obj}	t (s)	d1 (m)	d2 (m)	c (Ns/m)	k (N/m)	b (kg)	f _{obj}	t (s)	d1 (m)	d2 (m)	c (Ns/m)	k (N/m)	b (kg)	f _{obj}	t (s)	d1 (m)	d2 (m)		
1	9,43E+05	1,03E+06	9,10E+04	0,000127	3,860	0,00573	0,00537	7,11E+05	2,62E+06	6,55E+04	9,76E+02	6,072	0,00603	0,00504	2,23E+05	3,00E+06	2,98E+04	2,891814	6,984	0,00721	0,00456		
2	9,39E+05	1,16E+06	8,99E+04	0,000127	3,987	0,00573	0,00537	7,11E+05	2,62E+06	6,55E+04	9,76E+02	5,907	0,00603	0,00504	2,24E+05	2,97E+06	3,00E+04	2,891814	6,980	0,00719	0,00454		
3	9,31E+05	1,39E+06	8,78E+04	0,000127	3,178	0,00576	0,00530	7,11E+05	2,62E+06	6,55E+04	9,76E+02	6,773	0,00603	0,00504	2,24E+05	2,97E+06	3,00E+04	2,891814	5,711	0,00719	0,00454		
4	9,35E+05	1,41E+06	8,81E+04	0,000127	2,344	0,00577	0,00524	7,11E+05	2,62E+06	6,55E+04	9,76E+02	6,968	0,00603	0,00504	2,24E+05	2,97E+06	3,00E+04	2,891814	5,183	0,00719	0,00454		
5	9,39E+05	1,16E+06	8,99E+04	0,000127	4,078	0,00573	0,00537	7,11E+05	2,62E+06	6,55E+04	9,76E+02	6,501	0,00603	0,00504	2,24E+05	2,97E+06	3,00E+04	2,891814	5,684	0,00719	0,00454		
6	9,39E+05	1,16E+06	8,99E+04	0,000127	3,651	0,00573	0,00537	7,09E+05	2,62E+06	6,55E+04	9,76E+02	8,237	0,00603	0,00503	2,24E+05	2,97E+06	3,00E+04	2,891814	5,308	0,00719	0,00454		
7	9,24E+05	1,59E+06	8,63E+04	0,000127	2,859	0,00572	0,00537	7,11E+05	2,62E+06	6,55E+04	9,76E+02	6,108	0,00603	0,00504	2,24E+05	2,97E+06	3,00E+04	2,891814	6,167	0,00719	0,00454		
8	9,48E+05	1,46E+06	8,81E+04	0,000127	3,933	0,00571	0,00540	7,11E+05	2,62E+06	6,55E+04	9,76E+02	6,762	0,00603	0,00504	2,24E+05	2,97E+06	3,00E+04	2,891814	5,688	0,00719	0,00454		
9	9,07E+05	1,92E+06	8,36E+04	0,000127	3,301	0,00574	0,00535	7,11E+05	2,62E+06	6,55E+04	9,76E+02	6,644	0,00603	0,00504	2,24E+05	2,97E+06	3,00E+04	2,891814	6,125	0,00719	0,00454		
10	9,38E+05	1,24E+06	8,95E+04	0,000127	2,384	0,00709	0,00558	7,11E+05	2,62E+06	6,55E+04	9,76E+02	6,090	0,00603	0,00504	2,24E+05	2,97E+06	3,00E+04	2,891814	6,192	0,00719	0,00454		
11	9,40E+05	1,11E+06	9,04E+04	0,000127	3,399	0,00573	0,00537	7,11E+05	2,62E+06	6,55E+04	9,76E+02	6,028	0,00603	0,00504	2,24E+05	2,97E+06	3,00E+04	2,891814	6,197	0,00719	0,00454		
12	9,35E+05	1,28E+06	8,88E+04	0,000127	3,127	0,00574	0,00536	7,11E+05	2,62E+06	6,55E+04	9,76E+02	6,229	0,00603	0,00504	2,24E+05	2,97E+06	3,00E+04	2,891814	6,040	0,00719	0,00454		
13	9,39E+05	1,16E+06	8,99E+04	0,000127	3,136	0,00573	0,00537	7,11E+05	2,62E+06	6,55E+04	9,76E+02	6,372	0,00603	0,00504	2,24E+05	2,97E+06	3,00E+04	2,891814	6,046	0,00719	0,00454		
14	9,35E+05	1,30E+06	8,87E+04	0,000127	3,032	0,00574	0,00537	7,11E+05	2,62E+06	6,55E+04	9,76E+02	5,954	0,00603	0,00504	2,24E+05	2,97E+06	3,00E+04	2,891814	8,401	0,00719	0,00454		
15	9,55E+05	3,13E+05	9,80E+04	0,000127	3,382	0,00573	0,00538	7,11E+05	2,62E+06	6,55E+04	9,76E+02	6,283	0,00603	0,00504	2,24E+05	2,97E+06	3,00E+04	2,891814	7,898	0,00719	0,00454		
16	9,40E+05	1,13E+06	9,02E+04	0,000127	3,159	0,00573	0,00537	7,11E+05	2,62E+06	6,55E+04	9,76E+02	6,097	0,00603	0,00504	2,24E+05	2,97E+06	3,00E+04	2,891814	5,929	0,00719	0,00454		
17	9,39E+05	1,16E+06	8,99E+04	0,000127	3,239	0,00573	0,00537	7,11E+05	2,62E+06	6,55E+04	9,76E+02	5,904	0,00603	0,00504	2,24E+05	2,98E+06	3,00E+04	2,891814	6,370	0,00719	0,00454		
18	9,52E+05	7,21E+05	9,43E+04	0,000127	2,725	0,00573	0,00536	6,26E+05	3,09E+06	6,02E+04	9,77E+02	9,235	0,00608	0,00495	2,24E+05	2,97E+06	3,00E+04	2,891814	5,785	0,00719	0,00454		
19	9,54E+05	2,60E+05	9,85E+04	0,000127	3,197	0,00573	0,00536	7,11E+05	2,62E+06	6,55E+04	9,76E+02	7,978	0,00603	0,00504	2,24E+05	2,97E+06	3,00E+04	2,891814	5,557	0,00719	0,00454		
20	9,39E+05	1,16E+06	8,99E+04	0,000127	3,855	0,00573	0,00537	7,11E+05	2,62E+06	6,55E+04	9,76E+02	7,103	0,00603	0,00504	2,24E+05	2,97E+06	3,00E+04	2,891814	5,824	0,00719	0,00454		
21	8,69E+05	2,84E+06	7,69E+04	0,000128	2,587	0,00563	0,00539	7,11E+05	2,62E+06	6,55E+04	9,76E+02	6,182	0,00603	0,00504	2,24E+05	2,97E+06	3,00E+04	2,891814	5,534	0,00719	0,00454		
22	9,46E+05	9,00E+05	9,23E+04	0,000127	3,197	0,00573	0,00536	7,11E+05	2,62E+06	6,55E+04	9,76E+02	5,971	0,00603	0,00504	2,24E+05	2,97E+06	3,00E+04	2,891814	6,370	0,00719	0,00454		
23	9,49E+05	7,64E+05	9,36E+04	0,000127	3,421	0,00572	0,00539	7,11E+05	2,62E+06	6,55E+04	9,76E+02	6,042	0,00603	0,00504	2,24E+05	2,97E+06	3,00E+04	2,891814	7,473	0,00719	0,00454		
24	9,39E+05	1,16E+06	8,99E+04	0,000127	5,203	0,00573	0,00537	7,11E+05	2,62E+06	6,55E+04	9,76E+02	5,962	0,00603	0,00504	2,24E+05	2,97E+06	3,00E+04	2,891814	5,832	0,00719	0,00454		
25	9,39E+05	1,16E+06	8,99E+04	0,000127	4,295	0,00573	0,00537	7,04E+05	2,71E+06	6,48E+04	9,76E+02	8,581	0,00603	0,00504	2,24E+05	2,97E+06	3,00E+04	2,891814	6,348	0,00719	0,00454		
26	9,30E+05	1,47E+06	8,71E+04	0,000127	3,285	0,00576	0,00533	7,18E+05	2,59E+06	6,57E+04	9,76E+02	7,901	0,00603	0,00505	2,24E+05	2,97E+06	3,00E+04	2,891814	5,926	0,00719	0,00454		
27	9,43E+05	1,02E+06	9,12E+04	0,000127	2,911	0,00573	0,00537	7,11E+05	2,62E+06	6,55E+04	9,76E+02	6,188	0,00603	0,00504	2,24E+05	2,97E+06	3,00E+04	2,891814	5,002	0,00719	0,00454		
28	9,39E+05	1,15E+06	9,00E+04	0,000127	3,403	0,00573	0,00537	7,11E+05	2,62E+06	6,55E+04	9,76E+02	6,094	0,00603	0,00504	2,24E+05	2,97E+06	3,00E+04	2,891814	5,243	0,00719	0,00454		
29	9,22E+05	1,68E+06	8,56E+04	0,000127	2,753	0,00579	0,00532	8,06E+05	1,32E+06	7,74E+04	9,78E+02	9,084	0,00598	0,00510	2,24E+05	2,97E+06	3,00E+04	2,891814	5,115	0,00719	0,00454		
30	9,51E+05	6,87E+05	9,37E+04	0,000127	2,849	0,00597	0,00504	7,11E+05	2,62E+06	6,55E+04	9,76E+02	5,718	0,00603	0,00504	2,24E+05	2,97E+06	3,00E+04	2,891814	5,135	0,00719	0,00454		
Média	9,37E+05	1,20E+06	8,98E+04	0,000127	3,32	0,0058	0,0054	7,12E+05	2,59E+06	6,57E+04	9,76E+02	6,70	0,0060	0,0050	2,24E+05	2,98E+06	3,00E+04	2,891814	6,07	0,0072	0,0045		
Desvio Padrão	1,61E+04	4,68E+05	3,97E+03	6,61E-08	6,01E-01	2,52E-04	7,75E-05	2,37E+04	2,55E+05	2,42E+03	4,32E-01	5,17E-01	1,37E-05	1,98E-05	0,10%	0,16%	0,09%	0,00%	13,3%	0,06%	0,07%		
Coef. de Variação	1,72%	39,1%	4,43%	0,05%	18,1%	4,36%	1,45%	3,33%	9,84%	3,68%	0,04%	14,9%	0,23%	0,39%									

Quadro Ap.4 – Resultados da otimização AIMS – Caso 1.

DRP									ENG							
Análise	c (Ns/m)	k (N/m)	m _t (kg)	b (kg)	f _{obj}	t (s)	d1 (m)	d2 (m)	c (Ns/m)	k (N/m)	m _t (kg)	b (kg)	f _{obj}	t (s)	d1 (m)	d2 (m)
1	9,16E+05	3,88E+03	9,00E+02	1,01E+05	0,000128	5,004	0,00577	0,00532	6,17E+05	3,21E+06	7,15E+03	5,74E+04	9,67E+02	9,104	0,00613	0,00508
2	9,47E+05	2,52E+03	9,00E+02	1,01E+05	0,000128	4,761	0,00574	0,00534	7,05E+05	2,68E+06	9,45E+02	6,51E+04	9,74E+02	9,427	0,00603	0,00505
3	8,48E+05	1,40E+03	9,03E+02	1,02E+05	0,000128	3,730	0,00585	0,00516	6,17E+05	3,21E+06	7,15E+03	5,74E+04	9,67E+02	8,693	0,00613	0,00508
4	8,23E+05	3,35E+03	9,09E+02	1,02E+05	0,000129	2,965	0,00595	0,00539	6,17E+05	3,21E+06	7,15E+03	5,74E+04	9,67E+02	9,017	0,00613	0,00508
5	8,93E+05	3,41E+03	1,02E+03	1,02E+05	0,000128	2,953	0,00589	0,00525	6,17E+05	3,21E+06	7,15E+03	5,74E+04	9,67E+02	6,699	0,00613	0,00508
6	9,43E+05	2,74E+03	9,00E+02	1,01E+05	0,000128	4,667	0,00571	0,00536	6,17E+05	3,21E+06	7,15E+03	5,74E+04	9,67E+02	8,655	0,00613	0,00508
7	9,35E+05	2,85E+03	9,14E+02	1,03E+05	0,000128	3,264	0,00595	0,00542	6,17E+05	3,21E+06	7,15E+03	5,74E+04	9,67E+02	7,074	0,00613	0,00508
8	9,31E+05	1,62E+03	9,02E+02	1,01E+05	0,000128	4,492	0,00575	0,00535	6,17E+05	3,21E+06	7,15E+03	5,74E+04	9,67E+02	6,712	0,00613	0,00508
9	9,45E+05	1,02E+03	9,05E+02	1,01E+05	0,000128	4,057	0,00580	0,00541	6,17E+05	3,21E+06	7,15E+03	5,74E+04	9,67E+02	7,678	0,00613	0,00508
10	8,94E+05	4,19E+03	9,70E+02	1,00E+05	0,000128	2,932	0,00764	0,00651	6,17E+05	3,21E+06	7,15E+03	5,74E+04	9,67E+02	6,758	0,00613	0,00508
11	9,33E+05	1,44E+03	9,00E+02	1,01E+05	0,000128	4,259	0,00573	0,00539	6,17E+05	3,21E+06	7,15E+03	5,74E+04	9,67E+02	6,297	0,00613	0,00508
12	8,71E+05	2,01E+03	9,13E+02	1,00E+05	0,000128	4,202	0,00583	0,00522	6,17E+05	3,21E+06	7,15E+03	5,74E+04	9,67E+02	8,014	0,00613	0,00508
13	9,11E+05	2,16E+03	9,01E+02	1,01E+05	0,000128	4,408	0,00592	0,00531	6,17E+05	3,21E+06	7,15E+03	5,74E+04	9,67E+02	7,408	0,00613	0,00508
14	9,30E+05	3,86E+03	9,00E+02	1,01E+05	0,000128	4,773	0,00575	0,00535	6,17E+05	3,21E+06	7,15E+03	5,74E+04	9,67E+02	7,734	0,00613	0,00508
15	9,44E+05	2,69E+03	9,03E+02	9,99E+04	0,000128	3,908	0,00574	0,00538	6,17E+05	3,21E+06	7,15E+03	5,74E+04	9,67E+02	10,041	0,00613	0,00508
16	8,53E+05	2,19E+03	9,09E+02	1,02E+05	0,000128	4,274	0,00585	0,00517	6,17E+05	3,21E+06	7,15E+03	5,74E+04	9,67E+02	10,325	0,00613	0,00508
17	9,44E+05	1,53E+03	9,00E+02	1,01E+05	0,000128	4,699	0,00575	0,00539	6,17E+05	3,21E+06	7,15E+03	5,74E+04	9,67E+02	10,747	0,00613	0,00508
18	8,16E+05	4,12E+03	9,56E+02	9,98E+04	0,000129	3,651	0,00590	0,00507	6,20E+05	3,13E+06	7,45E+03	5,80E+04	9,67E+02	9,131	0,00612	0,00508
19	9,34E+05	3,04E+03	9,00E+02	1,01E+05	0,000128	5,121	0,00575	0,00536	6,17E+05	3,21E+06	7,15E+03	5,74E+04	9,67E+02	9,184	0,00613	0,00508
20	9,39E+05	4,12E+03	9,11E+02	1,01E+05	0,000128	3,540	0,00854	0,00740	6,17E+05	3,21E+06	7,15E+03	5,74E+04	9,67E+02	6,539	0,00613	0,00508
21	9,30E+05	1,61E+03	9,11E+02	1,01E+05	0,000128	4,175	0,00579	0,00533	6,17E+05	3,21E+06	7,15E+03	5,74E+04	9,67E+02	7,837	0,00613	0,00508
22	8,27E+05	2,37E+03	9,01E+02	1,00E+05	0,000129	3,981	0,00604	0,00509	6,17E+05	3,21E+06	7,15E+03	5,74E+04	9,67E+02	6,550	0,00613	0,00508
23	8,98E+05	2,94E+03	9,23E+02	1,01E+05	0,000128	3,598	0,00641	0,00547	6,17E+05	3,21E+06	7,15E+03	5,74E+04	9,67E+02	7,367	0,00613	0,00508
24	8,58E+05	3,60E+03	9,07E+02	1,01E+05	0,000128	4,177	0,00586	0,00519	6,17E+05	3,21E+06	7,15E+03	5,74E+04	9,67E+02	10,026	0,00613	0,00508
25	9,12E+05	3,94E+03	9,01E+02	1,01E+05	0,000128	4,711	0,00579	0,00531	6,17E+05	3,21E+06	7,15E+03	5,74E+04	9,67E+02	8,929	0,00613	0,00508
26	8,82E+05	3,68E+03	9,10E+02	1,00E+05	0,000128	4,769	0,00581	0,00523	6,17E+05	3,21E+06	7,15E+03	5,74E+04	9,67E+02	8,794	0,00613	0,00508
27	9,34E+05	1,59E+03	9,00E+02	1,01E+05	0,000128	5,322	0,00575	0,00536	6,17E+05	3,21E+06	7,15E+03	5,74E+04	9,67E+02	6,610	0,00613	0,00508
28	8,68E+05	1,00E+03	9,00E+02	1,00E+05	0,000128	5,070	0,00585	0,00521	6,17E+05	3,21E+06	7,15E+03	5,74E+04	9,67E+02	10,306	0,00613	0,00508
29	9,07E+05	1,52E+03	1,08E+03	1,01E+05	0,000128	3,064	0,00567	0,00530	6,17E+05	3,21E+06	7,15E+03	5,74E+04	9,67E+02	5,844	0,00613	0,00508
30	9,32E+05	2,59E+03	9,00E+02	1,00E+05	0,000128	5,033	0,00576	0,00536	6,17E+05	3,21E+06	7,15E+03	5,74E+04	9,67E+02	5,757	0,00613	0,00508
Média	9,03E+05	2,63E+03	9,18E+02	1,01E+05	0,000128	4,19	0,0060	0,0054	6,20E+05	3,19E+06	6,96E+03	5,77E+04	9,67E+02	8,11	0,0061	0,0051
Desvio Padrão	4,05E+04	1,01E+03	4,00E+01	7,13E+02	3,18E-07	7,04E-01	6,00E-04	4,46E-04	1,62E+04	9,67E+04	1,14E+03	1,41E+03	1,29E+00	1,45E+00	1,86E-05	5,11E-06
Coef. de Variação	4,48%	38,5%	4,36%	0,71%	0,25%	16,8%	10,0%	8,24%	2,62%	3,03%	16,3%	2,45%	0,13%	17,9%	0,30%	0,10%

ACL								
Análise	c (Ns/m)	k (N/m)	m _t (kg)	b (kg)	f _{obj}	t (s)	d1 (m)	d2 (m)
1	6,76E+05	1,00E+03	2,19E+04	6,78E+04	2,694204	7,890	0,00662	0,00555
2	6,75E+05	1,00E+03	2,15E+04	6,75E+04	2,694241	7,144	0,00664	0,00551
3	4,14E+05	1,00E+03	1,72E+04	6,78E+04	2,927253	7,716	0,00668	0,00541
4	4,16E+05	1,00E+03	1,65E+04	6,78E+04	2,922701	6,861	0,00668	0,00579
5	4,16E+05	1,00E+03	1,65E+04	6,78E+04	2,922701	6,861	0,00668	0,00579
6	6,77E+05	1,01E+03	2,19E+04	6,78E+04	2,694205	7,245	0,00674	0,00562
7	6,83E+05	1,00E+03	2,19E+04	6,70E+04	2,694271	9,905	0,00673	0,00556
8	6,77E+05	1,00E+03	2,19E+04	6,78E+04	2,694204	8,122	0,00666	0,00563
9	6,78E+05	1,00E+03	2,16E+04	6,58E+04	2,694465	7,307	0,00666	0,00563
10	6,77E+05	1,00E+03	2,23E+04	6,80E+04	2,694245	6,190	0,00666	0,00562
11	6,79E+05	1,00E+03	2,20E+04	6,75E+04	2,694213	8,178	0,00649	0,00615
12	6,82E+05	1,26E+03	2,13E+04	6,80E+04	2,694424	8,240	0,00666	0,00550
13	6,82E+05	1,00E+03	2,29E+04	6,84E+04	2,694446	10,584	0,00664	0,00554
14	6,77E+05	1,00E+03	2,19E+04	6,78E+04	2,694204	8,122	0,00666	0,00563
15	6,77E+05	1,00E+03	2,19E+04	6,78E+04	2,694204	8,122	0,00666	0,00563
16	6,76E+05	1,00E+03	2,19E+04	6,78E+04	2,694205	9,128	0,00665	0,00560
17	6,76E+05	1,00E+03	2,18E+04	6,78E+04	2,694207	8,470	0,00664	0,00552
18	6,76E+05	1,00E+03	2,19E+04	6,78E+04	2,694204	7,680	0,00666	0,00564
19	6,76E+05	1,00E+03	2,19E+04	6,78E+04	2,694205	9,128	0,00665	0,00560
20	6,76E+05	1,00E+03	2,19E+04	6,78E+04	2,694205	9,128	0,00665	0,00560
21	6,85E+05	1,00E+03	2,24E+04	6,77E+04	2,694281	7,437	0,00667	0,00560
22	4,16E+05	1,00E+03	1,65E+04	6,78E+04	2,922701	6,861	0,00668	0,00579
23	6,77E+05	1,00E+03	2,19E+04	6,78E+04	2,694204	8,122	0,00666	0,00563
24	6,82E+05	1,00E+03	2,25E+04	6,81E+04	2,694281	8,708	0,00670	0,00561
25	6,76E+05	1,00E+03	2,14E+04	6,78E+04	2,694282	7,731	0,00666	0,00575
26	6,92E+05	1,00E+03	2,30E+04	6,51E+04	2,695046	8,660	0,00665	0,00550
27	6,85E+05	1,00E+03	2,24E+04	6,77E+04	2,694281	7,437	0,00667	0,00560
28	6,77E+05	1,00E+03	2,23E+04	6,80E+04	2,694240	8,147	0,00667	0,00553
29	6,77E+05	1,00E+03	2,23E+04	6,80E+04	2,694240	8,147	0,00667	0,00553
30	6,77E+05	1,00E+03	2,19E+04	6,78E+04	2,694204	8,122	0,00666	0,00563
Média	6,44E+05	1,01E+03	2,13E+04	6,76E+04	2,724892	8,05	0,0067	0,0056
Desvio Padrão	9,11E+04	4,71E+01	1,88E+03	6,35E+02	7,94E-02	9,34E-01	4,01E-05	1,32E-04
Coef. de Variação	14,2%	4,67%	8,84%	0,94%	2,91%	11,6%	0,60%	2,35%

Quadro Ap.5 – Resultados da otimização VD – Caso 2.

DRP								ENG								
Análise	Posição	c (Ns/m)	k (N/m)	b (kg)	f _{obj}	t (s)	d1 (m)	d2 (m)	Posição	c (Ns/m)	k (N/m)	b (kg)	f _{obj}	t (s)	d1 (m)	d2 (m)
1	'1 3'	3,03E+05	0	0	0,000573	3,419	0,01077	0,00704	'1 4'	2,79E+05	0	0	4,60E+03	14,822	0,00892	0,00723
2	'1 4'	3,03E+05	0	0	0,000573	6,439	0,00881	0,00734	'1 4'	2,79E+05	0	0	4,60E+03	14,542	0,00892	0,00723
3	'1 4'	3,03E+05	0	0	0,000573	5,474	0,00881	0,00734	'1 4'	2,79E+05	0	0	4,60E+03	13,632	0,00892	0,00723
4	'1 4'	3,03E+05	0	0	0,000573	5,527	0,00891	0,00724	'1 4'	2,79E+05	0	0	4,60E+03	12,329	0,00892	0,00723
5	'1 4'	3,03E+05	0	0	0,000573	4,619	0,00893	0,00722	'1 4'	2,79E+05	0	0	4,60E+03	13,483	0,00892	0,00723
6	'1 4'	3,03E+05	0	0	0,000573	5,661	0,00881	0,00734	'1 4'	2,79E+05	0	0	4,60E+03	13,080	0,00892	0,00723
7	'1 4'	3,03E+05	0	0	0,000573	7,188	0,00881	0,00734	'1 4'	2,79E+05	0	0	4,60E+03	13,148	0,00892	0,00723
8	'1 4'	3,03E+05	0	0	0,000573	5,614	0,00881	0,00734	'1 4'	2,79E+05	0	0	4,60E+03	11,509	0,00892	0,00723
9	'1 4'	3,03E+05	0	0	0,000573	4,309	0,00942	0,00699	'1 4'	2,79E+05	0	0	4,60E+03	12,282	0,00892	0,00723
10	'1 4'	3,03E+05	0	0	0,000573	5,875	0,00881	0,00735	'1 4'	2,79E+05	0	0	4,60E+03	12,170	0,00892	0,00723
11	'1 4'	3,03E+05	0	0	0,000573	6,092	0,00880	0,00736	'1 4'	2,79E+05	0	0	4,60E+03	12,994	0,00892	0,00723
12	'1 4'	3,03E+05	0	0	0,000573	5,512	0,00880	0,00736	'1 4'	2,79E+05	0	0	4,60E+03	12,110	0,00892	0,00723
13	'1 4'	3,03E+05	0	0	0,000573	4,387	0,00870	0,00751	'1 4'	2,79E+05	0	0	4,60E+03	11,423	0,00892	0,00723
14	'1 4'	3,03E+05	0	0	0,000573	5,308	0,00882	0,00733	'1 4'	2,79E+05	0	0	4,60E+03	12,548	0,00892	0,00723
15	'1 4'	3,03E+05	0	0	0,000573	5,091	0,00881	0,00734	'1 4'	2,79E+05	0	0	4,60E+03	12,479	0,00892	0,00723
16	'1 4'	3,03E+05	0	0	0,000573	4,306	0,00881	0,00735	'1 4'	2,79E+05	0	0	4,60E+03	11,287	0,00892	0,00723
17	'1 4'	3,03E+05	0	0	0,000573	3,943	0,00881	0,00735	'1 4'	2,79E+05	0	0	4,60E+03	11,881	0,00892	0,00723
18	'1 4'	3,03E+05	0	0	0,000573	4,456	0,00874	0,00744	'1 4'	2,79E+05	0	0	4,60E+03	12,175	0,00892	0,00723
19	'1 4'	3,03E+05	0	0	0,000573	4,749	0,00881	0,00735	'1 4'	2,79E+05	0	0	4,60E+03	13,714	0,00892	0,00723
20	'1 4'	3,03E+05	0	0	0,000573	5,826	0,00881	0,00734	'1 4'	2,79E+05	0	0	4,60E+03	12,179	0,00892	0,00723
21	'1 4'	3,03E+05	0	0	0,000573	5,526	0,00881	0,00734	'1 4'	2,79E+05	0	0	4,60E+03	15,470	0,00892	0,00723
22	'1 4'	3,03E+05	0	0	0,000573	4,964	0,00881	0,00734	'1 4'	2,79E+05	0	0	4,60E+03	13,600	0,00892	0,00723
23	'1 4'	3,03E+05	0	0	0,000573	4,479	0,00882	0,00734	'1 4'	2,79E+05	0	0	4,60E+03	13,073	0,00892	0,00723
24	'2 4'	3,03E+05	0	0	0,000573	3,415	0,01038	0,01103	'1 4'	2,79E+05	0	0	4,60E+03	12,690	0,00892	0,00723
25	'4'	3,25E+05	0	0	0,000576	3,986	0,00908	0,00711	'1 4'	2,79E+05	0	0	4,60E+03	12,046	0,00892	0,00723
26	'4'	3,26E+05	0	0	0,000576	4,620	0,00912	0,00707	'1 4'	2,79E+05	0	0	4,60E+03	13,573	0,00892	0,00723
27	'4'	3,25E+05	0	0	0,000576	5,590	0,00910	0,00709	'4'	3,06E+05	0	0	4,60E+03	11,997	0,00917	0,00702
28	'4'	3,25E+05	0	0	0,000576	4,749	0,00917	0,00702	'4'	3,06E+05	0	0	4,60E+03	12,454	0,00917	0,00702
29	'4'	3,25E+05	0	0	0,000576	3,639	0,00899	0,00729	'4'	3,06E+05	0	0	4,60E+03	10,158	0,00917	0,00702
30	'4'	3,25E+05	0	0	0,000576	3,420	0,00977	0,00929	'4'	3,06E+05	0	0	4,60E+03	13,166	0,00917	0,00702
Média	Posição '1 4'	3,03E+05	0	0	0,000573	5,24	0,0088	0,0073	Posição '1 4'	2,79E+05	0	0	4,60E+03	12,86	0,0089	0,0072
Desvio Padrão		6,58E+01	0	0	4,87E-11	7,99E-01	1,38E-04	9,37E-05		1,92E-02	0	0	3,67E-11	1,05E+00	4,70E-09	4,01E-09
Coef. de Variação		0,02%	0	0	0,00%	15,2%	1,56%	1,28%		0,00%	0	0	0,00%	8,13%	0,00%	0,00%

ACL								
Análise	Posição	c (Ns/m)	k (N/m)	b (kg)	f _{obj}	t (s)	d1 (m)	d2 (m)
1	'1 3'	2,25E+05	0	0	2,382156	11,982	0,01049	0,00704
2	'1 4'	2,25E+05	0	0	2,382155	10,794	0,00931	0,00702
3	'1 4'	2,25E+05	0	0	2,382156	11,059	0,00931	0,00702
4	'1 4'	2,25E+05	0	0	2,382156	9,593	0,00931	0,00702
5	'1 4'	2,25E+05	0	0	2,382155	11,502	0,00931	0,00702
6	'1 4'	2,25E+05	0	0	2,382156	11,099	0,00931	0,00702
7	'1 4'	2,25E+05	0	0	2,382155	10,328	0,00931	0,00702
8	'2 4'	1,81E+05	0	0	2,384445	10,711	0,00940	0,00698
9	'2 4'	1,81E+05	0	0	2,384445	9,365	0,00940	0,00698
10	'2 4'	1,81E+05	0	0	2,384445	8,520	0,00943	0,00697
11	'2 4'	1,81E+05	0	0	2,384444	9,888	0,00940	0,00698
12	'2 4'	1,81E+05	0	0	2,384445	10,149	0,00940	0,00698
13	'4'	2,71E+05	0	0	2,381491	9,570	0,00933	0,00692
14	'4'	2,71E+05	0	0	2,381491	7,856	0,00929	0,00694
15	'4'	2,71E+05	0	0	2,381492	10,437	0,00933	0,00692
16	'4'	2,71E+05	0	0	2,381491	9,277	0,00933	0,00692
17	'4'	2,71E+05	0	0	2,381491	7,937	0,00933	0,00692
18	'4'	2,71E+05	0	0	2,381491	9,606	0,00933	0,00692
19	'4'	2,71E+05	0	0	2,381492	9,741	0,00933	0,00692
20	'4'	2,71E+05	0	0	2,381491	11,001	0,00933	0,00692
21	'4'	2,71E+05	0	0	2,381491	9,526	0,00933	0,00692
22	'4'	2,71E+05	0	0	2,381492	10,042	0,00933	0,00692
23	'4'	2,71E+05	0	0	2,381491	10,825	0,00933	0,00692
24	'4'	2,71E+05	0	0	2,381491	10,496	0,00933	0,00692
25	'4'	2,71E+05	0	0	2,381491	10,359	0,00933	0,00692
26	'4'	2,71E+05	0	0	2,381492	10,021	0,00933	0,00692
27	'4'	2,71E+05	0	0	2,381492	10,167	0,00933	0,00692
28	'4'	2,71E+05	0	0	2,381491	10,076	0,00933	0,00692
29	'4'	2,71E+05	0	0	2,381492	10,568	0,00933	0,00692
30	'4'	2,71E+05	0	0	2,381492	10,290	0,00933	0,00692
Média	Posição '4'	2,71E+05	0	0	2,38	9,88	0,0093	0,0069
Desvio Padrão		7,66E+00	0	0	2,05E-07	8,55E-01	1,04E-05	5,07E-06
Coef. de Variação		0,00%	0	0	0,00%	8,66%	0,11%	0,07%

Quadro Ap.6 – Resultados da otimização VDI – Caso 2.

DRP									ENG							
Análise	Posição	c (Ns/m)	k (N/m)	b (kg)	f _{obj}	t (s)	d1 (m)	d2 (m)	Posição	c (Ns/m)	k (N/m)	b (kg)	f _{obj}	t (s)	d1 (m)	d2 (m)
1	'1 3'	3,31E+05	0	4,94E+04	0,000571	10,062	0,00883	0,00877	'1 4'	2,59E+05	0	2,40E+04	4,36E+03	8,334	0,00853	0,00807
2	'1 4'	2,74E+05	0	2,96E+04	0,000528	11,587	0,00836	0,00836	'1 4'	2,59E+05	0	2,40E+04	4,36E+03	8,670	0,00853	0,00807
3	'1 4'	2,74E+05	0	2,96E+04	0,000528	9,062	0,00837	0,00838	'1 4'	2,59E+05	0	2,40E+04	4,36E+03	9,044	0,00853	0,00807
4	'1 4'	2,74E+05	0	2,96E+04	0,000528	9,021	0,00838	0,00835	'1 4'	2,59E+05	0	2,40E+04	4,36E+03	9,567	0,00853	0,00807
5	'1 4'	2,75E+05	0	2,96E+04	0,000528	9,075	0,00828	0,00852	'1 4'	2,59E+05	0	2,40E+04	4,36E+03	8,759	0,00853	0,00807
6	'2 4'	2,21E+05	0	2,50E+04	0,000530	7,749	0,01034	0,00919	'1 4'	2,59E+05	0	2,40E+04	4,36E+03	8,879	0,00853	0,00807
7	'2 4'	2,21E+05	0	2,50E+04	0,000530	9,568	0,00824	0,00838	'1 4'	2,59E+05	0	2,40E+04	4,36E+03	8,396	0,00853	0,00807
8	'2 4'	2,20E+05	0	2,50E+04	0,000530	7,692	0,01452	0,00798	'1 4'	2,59E+05	0	2,40E+04	4,36E+03	8,952	0,00853	0,00807
9	'3'	3,67E+05	0	5,34E+04	0,000570	6,936	0,00927	0,00895	'2 4'	2,09E+05	0	2,39E+04	4,34E+03	9,336	0,00842	0,00826
10	'3'	3,67E+05	0	5,37E+04	0,000570	6,575	0,00872	0,00851	'2 4'	2,09E+05	0	2,39E+04	4,34E+03	8,359	0,00842	0,00826
11	'3 4'	2,23E+05	0	2,46E+04	0,000530	6,186	0,00925	0,01090	'2 4'	2,09E+05	0	2,39E+04	4,34E+03	8,978	0,00842	0,00826
12	'4'	2,91E+05	0	3,11E+04	0,000529	8,426	0,00849	0,00801	'2 4'	2,09E+05	0	2,39E+04	4,34E+03	8,393	0,00842	0,00826
13	'4'	2,91E+05	0	3,11E+04	0,000529	9,490	0,00850	0,00800	'2 4'	2,09E+05	0	2,39E+04	4,34E+03	8,876	0,00842	0,00826
14	'4'	2,91E+05	0	3,11E+04	0,000529	8,491	0,00850	0,00799	'3'	3,50E+05	0	4,03E+04	4,72E+03	8,258	0,00908	0,00801
15	'4'	2,91E+05	0	3,11E+04	0,000529	7,793	0,00852	0,00798	'3 4'	1,67E+05	0	1,44E+04	4,40E+03	10,475	0,00868	0,00780
16	'4'	2,91E+05	0	3,11E+04	0,000529	9,072	0,00850	0,00800	'4'	2,80E+05	0	2,34E+04	4,36E+03	8,492	0,00867	0,00766
17	'4'	2,91E+05	0	3,11E+04	0,000529	10,262	0,00852	0,00801	'4'	2,80E+05	0	2,34E+04	4,36E+03	9,444	0,00867	0,00766
18	'4'	2,91E+05	0	3,11E+04	0,000529	10,368	0,00846	0,00800	'4'	2,80E+05	0	2,34E+04	4,36E+03	8,298	0,00867	0,00766
19	'4'	2,91E+05	0	3,11E+04	0,000529	7,759	0,00850	0,00800	'4'	2,80E+05	0	2,34E+04	4,36E+03	7,614	0,00867	0,00766
20	'4'	2,91E+05	0	3,11E+04	0,000529	12,009	0,00850	0,00800	'4'	2,80E+05	0	2,34E+04	4,36E+03	7,930	0,00867	0,00766
21	'4'	2,91E+05	0	3,11E+04	0,000529	9,564	0,00850	0,00800	'4'	2,80E+05	0	2,34E+04	4,36E+03	8,326	0,00867	0,00766
22	'4'	2,91E+05	0	3,11E+04	0,000529	9,587	0,00850	0,00800	'4'	2,80E+05	0	2,34E+04	4,36E+03	8,129	0,00867	0,00766
23	'4'	2,91E+05	0	3,11E+04	0,000529	10,578	0,00850	0,00799	'4'	2,80E+05	0	2,34E+04	4,36E+03	8,113	0,00867	0,00766
24	'4'	2,91E+05	0	3,11E+04	0,000529	10,554	0,00850	0,00800	'4'	2,80E+05	0	2,34E+04	4,36E+03	9,080	0,00867	0,00766
25	'4'	2,90E+05	0	3,12E+04	0,000529	6,431	0,01024	0,00782	'4'	2,80E+05	0	2,34E+04	4,36E+03	8,971	0,00867	0,00766
26	'4'	2,91E+05	0	3,11E+04	0,000529	7,976	0,00850	0,00799	'4'	2,80E+05	0	2,34E+04	4,36E+03	9,980	0,00867	0,00766
27	'4'	2,91E+05	0	3,11E+04	0,000529	8,963	0,00850	0,00800	'4'	2,80E+05	0	2,34E+04	4,36E+03	7,945	0,00867	0,00766
28	'4'	2,91E+05	0	3,11E+04	0,000529	8,475	0,00851	0,00799	'4'	2,80E+05	0	2,34E+04	4,36E+03	8,367	0,00867	0,00766
29	'4'	2,91E+05	0	3,11E+04	0,000529	9,667	0,00850	0,00800	'4'	2,80E+05	0	2,34E+04	4,36E+03	8,854	0,00867	0,00766
30	'4'	2,91E+05	0	3,11E+04	0,000529	8,601	0,00859	0,00798	'4'	2,80E+05	0	2,34E+04	4,36E+03	7,933	0,00867	0,00766
Média		2,91E+05	0	3,11E+04	0,000529	9,16	0,0086	0,0080								
Desvio Padrão	Posição '4'	1,39E+02	0	1,49E+01	2,46E-10	1,29E+00	3,99E-04	4,04E-05	Posição '4'	2,80E+05	0	2,34E+04	4,36E+03	8,50	0,0087	0,0077
Coef. de Variação		0,05%	0	0,05%	0,00%	14,1%	4,64%	0,51%		0,00%	0	0,00%	0,00%	7,63%	0,00%	0,00%

ACL								
Análise	Posição	c (Ns/m)	k (N/m)	b (kg)	f _{obj}	t (s)	d1 (m)	d2 (m)
1	'1 2 3 4'	1,12E+05	0	1,39E+03	2,394439	15,396	0,00937	0,00714
2	'1 2 3 4'	1,12E+05	0	1,39E+03	2,394439	14,920	0,00937	0,00714
3	'1 2 3 4'	1,12E+05	0	1,39E+03	2,394439	14,870	0,00937	0,00714
4	'1 2 3 4'	1,12E+05	0	1,39E+03	2,394439	15,272	0,00937	0,00714
5	'1 2 3 4'	1,12E+05	0	1,39E+03	2,394439	13,959	0,00937	0,00714
6	'1 3'	2,46E+05	0	9,60E+03	2,450455	13,166	0,01000	0,00724
7	'1 3'	2,46E+05	0	9,60E+03	2,450455	13,504	0,01000	0,00724
8	'1 4'	2,25E+05	0	1,38E+03	2,380917	14,678	0,00927	0,00706
9	'1 4'	2,25E+05	0	1,38E+03	2,380917	13,514	0,00927	0,00706
10	'1 4'	2,25E+05	0	1,38E+03	2,380917	14,521	0,00927	0,00706
11	'1 4'	2,25E+05	0	1,38E+03	2,380917	14,795	0,00927	0,00706
12	'1 4'	2,25E+05	0	1,38E+03	2,380917	12,255	0,00927	0,00706
13	'1 4'	2,25E+05	0	1,38E+03	2,380917	15,095	0,00927	0,00706
14	'2 4'	1,81E+05	0	1,03E+03	2,383555	15,212	0,00935	0,00702
15	'2 4'	1,81E+05	0	1,03E+03	2,383555	14,017	0,00935	0,00702
16	'2 4'	1,81E+05	0	1,03E+03	2,383555	13,751	0,00935	0,00702
17	'2 4'	1,81E+05	0	1,03E+03	2,383555	15,159	0,00935	0,00702
18	'2 4'	1,81E+05	0	1,03E+03	2,383555	15,500	0,00935	0,00702
19	'3 4'	1,58E+05	0	1,93E+03	2,400853	13,757	0,00925	0,00705
20	'4'	2,71E+05	0	1,51E+03	2,380615	14,048	0,00929	0,00694
21	'4'	2,71E+05	0	1,51E+03	2,380615	14,051	0,00929	0,00694
22	'4'	2,71E+05	0	1,51E+03	2,380615	14,309	0,00929	0,00694
23	'4'	2,71E+05	0	1,51E+03	2,380615	13,900	0,00929	0,00694
24	'4'	2,71E+05	0	1,51E+03	2,380615	13,466	0,00929	0,00694
25	'4'	2,71E+05	0	1,51E+03	2,380615	13,864	0,00929	0,00694
26	'4'	2,71E+05	0	1,51E+03	2,380615	15,724	0,00929	0,00694
27	'4'	2,71E+05	0	1,51E+03	2,380615	13,754	0,00929	0,00694
28	'4'	2,71E+05	0	1,51E+03	2,380615	14,591	0,00929	0,00694
29	'4'	2,71E+05	0	1,51E+03	2,380615	15,787	0,00929	0,00694
30	'4'	2,71E+05	0	1,51E+03	2,380615	13,800	0,00929	0,00694
Média	Posição '4'	2,71E+05	0	1,51E+03	2,380615	14,30	0,0093	0,0069
Desvio Padrão		4,27E-02	0	5,38E-03	1,63E-14	7,78E-01	1,23E-07	5,99E-08
Coef. de Variação		0,00%	0	0,00%	0,00%	5,44%	0,00%	0,00%

Quadro Ap.7 – Resultados da otimização AIS – Caso 2.

DRP									ENG							
Análise	Posição	c (Ns/m)	k (N/m)	b (kg)	f _{obj}	t (s)	d1 (m)	d2 (m)	Posição	c (Ns/m)	k (N/m)	b (kg)	f _{obj}	t (s)	d1 (m)	d2 (m)
1	'1 4'	2,93E+05	4,96E+05	9,02E+04	0,000505	9,381	0,00806	0,00806	'1 2 3 4'	1,48E+05	1,00E+03	6,87E+05	4,62E+03	13,111	0,00881	0,00743
2	'1 4'	3,18E+05	1,00E+03	9,07E+05	0,000555	9,416	0,00856	0,00751	'1 3'	3,53E+05	8,55E+05	8,60E+04	4,24E+03	10,864	0,00864	0,00854
3	'1 4'	2,94E+05	4,92E+05	9,08E+04	0,000505	10,104	0,00806	0,00806	'1 4'	2,55E+05	6,47E+05	6,90E+04	3,97E+03	9,446	0,00820	0,00815
4	'1 4'	2,92E+05	5,03E+05	8,97E+04	0,000505	8,326	0,00806	0,00806	'1 4'	2,55E+05	6,47E+05	6,90E+04	3,97E+03	8,946	0,00820	0,00815
5	'1 4'	2,94E+05	4,93E+05	9,06E+04	0,000505	10,065	0,00806	0,00806	'1 4'	2,55E+05	6,47E+05	6,90E+04	3,97E+03	8,795	0,00820	0,00815
6	'1 4'	3,16E+05	1,00E+03	9,45E+05	0,000555	10,385	0,00857	0,00750	'1 4'	2,55E+05	6,47E+05	6,90E+04	3,97E+03	9,133	0,00820	0,00815
7	'1 4'	2,95E+05	4,86E+05	9,12E+04	0,000505	10,042	0,00806	0,00806	'1 4'	3,10E+05	1,00E+03	2,91E+05	4,23E+03	13,396	0,00831	0,00766
8	'1 4'	3,45E+05	1,00E+03	1,90E+05	0,000510	13,612	0,00803	0,00803	'1 4'	2,98E+05	1,00E+03	6,21E+05	4,41E+03	13,426	0,00858	0,00745
9	'1 4'	3,22E+05	2,86E+05	1,12E+05	0,000506	13,426	0,00807	0,00807	'1 4'	2,55E+05	6,47E+05	6,90E+04	3,97E+03	10,942	0,00820	0,00815
10	'1 4'	2,94E+05	4,92E+05	9,07E+04	0,000505	13,441	0,00806	0,00806	'1 4'	2,55E+05	6,47E+05	6,90E+04	3,97E+03	9,687	0,00820	0,00815
11	'2 4'	2,47E+05	3,97E+05	7,46E+04	0,000510	11,160	0,00807	0,00807	'2 4'	2,12E+05	5,26E+05	5,64E+04	3,98E+03	11,855	0,00823	0,00814
12	'2 4'	2,75E+05	1,66E+05	9,86E+04	0,000511	9,427	0,00808	0,00808	'2 4'	2,12E+05	5,26E+05	5,64E+04	3,98E+03	9,197	0,00823	0,00814
13	'2 4'	2,47E+05	3,97E+05	7,46E+04	0,000510	11,001	0,00807	0,00807	'3'	4,06E+05	1,00E+06	9,68E+04	4,24E+03	8,561	0,00862	0,00830
14	'3 4'	2,05E+05	3,11E+05	1,05E+05	0,000512	11,233	0,00814	0,00799	'3'	4,06E+05	1,00E+06	9,68E+04	4,24E+03	9,577	0,00862	0,00830
15	'4'	3,66E+05	5,00E+03	1,05E+05	0,000551	13,820	0,00870	0,00736	'4'	2,90E+05	7,05E+05	7,59E+04	3,94E+03	9,354	0,00825	0,00785
16	'4'	3,38E+05	5,24E+05	1,01E+05	0,000505	10,333	0,00814	0,00780	'4'	2,90E+05	7,05E+05	7,59E+04	3,94E+03	8,627	0,00825	0,00785
17	'4'	3,83E+05	5,42E+05	1,05E+05	0,000507	12,540	0,00814	0,00786	'4'	2,90E+05	7,05E+05	7,59E+04	3,94E+03	9,685	0,00825	0,00785
18	'4'	3,38E+05	5,24E+05	1,01E+05	0,000505	9,575	0,00814	0,00780	'4'	2,90E+05	7,05E+05	7,59E+04	3,94E+03	8,528	0,00825	0,00785
19	'4'	3,38E+05	5,24E+05	1,01E+05	0,000505	9,311	0,00814	0,00780	'4'	2,90E+05	7,05E+05	7,59E+04	3,94E+03	8,893	0,00825	0,00785
20	'4'	3,38E+05	5,24E+05	1,01E+05	0,000505	9,427	0,00814	0,00780	'4'	2,90E+05	7,05E+05	7,59E+04	3,94E+03	8,893	0,00825	0,00785
21	'4'	3,38E+05	5,24E+05	1,01E+05	0,000505	10,386	0,00814	0,00780	'4'	3,14E+05	7,12E+05	8,01E+04	3,95E+03	12,065	0,00818	0,00795
22	'4'	3,38E+05	5,24E+05	1,01E+05	0,000505	11,673	0,00814	0,00780	'4'	2,90E+05	7,05E+05	7,59E+04	3,94E+03	8,758	0,00825	0,00785
23	'4'	3,38E+05	5,24E+05	1,01E+05	0,000505	13,857	0,00814	0,00780	'4'	3,05E+05	6,28E+05	7,79E+04	3,95E+03	13,052	0,00827	0,00786
24	'4'	3,38E+05	5,24E+05	1,01E+05	0,000505	10,104	0,00814	0,00780	'4'	2,90E+05	7,05E+05	7,59E+04	3,94E+03	9,121	0,00825	0,00785
25	'4'	3,43E+05	5,03E+03	1,01E+05	0,000555	10,628	0,00882	0,00724	'4'	2,90E+05	7,05E+05	7,59E+04	3,94E+03	9,259	0,00825	0,00785
26	'4'	3,66E+05	5,00E+03	1,01E+05	0,000526	12,115	0,00843	0,00749	'4'	2,90E+05	7,05E+05	7,59E+04	3,94E+03	9,256	0,00825	0,00785
27	'4'	3,38E+05	5,24E+05	1,01E+05	0,000505	9,174	0,00814	0,00780	'4'	2,90E+05	7,05E+05	7,59E+04	3,94E+03	9,987	0,00825	0,00785
28	'4'	3,38E+05	5,24E+05	1,01E+05	0,000505	9,262	0,00814	0,00780	'4'	2,90E+05	7,05E+05	7,59E+04	3,94E+03	9,560	0,00825	0,00785
29	'4'	3,38E+05	5,24E+05	1,01E+05	0,000505	10,441	0,00814	0,00780	'4'	2,90E+05	7,05E+05	7,59E+04	3,94E+03	16,557	0,00825	0,00785
30	'4'	3,38E+05	5,24E+05	1,01E+05	0,000505	10,102	0,00814	0,00780	'4'	2,90E+05	7,05E+05	7,59E+04	3,94E+03	10,204	0,00825	0,00785
Média		3,38E+05	5,24E+05	1,01E+05	0,000512	10,80	0,0082	0,0077		2,92E+05	7,00E+05	7,63E+04	3,94E+03	10,63	0,0082	0,0079
Desvio Padrão	Posição	1,37E+04	2,20E+05	1,30E+04	1,67E-05	6,48E-01	2,17E-04	1,83E-04	Posição	6,93E+03	1,93E+04	1,12E+03	1,46E+00	2,72E+00	1,99E-05	2,56E-05
Coef. de Variação	'4'	3,96%	54,8%	12,4%	3,27%	14,4%	2,64%	2,37%	'4'	2,37%	2,76%	1,47%	0,04%	25,6%	0,24%	0,33%

ACL								
Análise	Posição	c (Ns/m)	k (N/m)	b (kg)	f _{obj}	t (s)	d1 (m)	d2 (m)
1	'1 4'	2,33E+05	1,03E+03	2,31E+05	2,359395	8,689	0,00889	0,00731
2	'1 4'	2,28E+05	1,00E+03	7,42E+05	2,373256	10,314	0,00913	0,00711
3	'1 4'	2,38E+05	1,00E+03	4,82E+05	2,369381	9,067	0,00897	0,00719
4	'1 4'	2,32E+05	1,12E+03	1,72E+05	2,356106	9,427	0,00888	0,00740
5	'1 4'	1,61E+05	6,91E+05	4,76E+04	2,325149	9,959	0,00880	0,00800
6	'1 4'	1,61E+05	6,91E+05	4,76E+04	2,325149	7,693	0,00880	0,00800
7	'1 4'	2,28E+05	1,00E+03	9,79E+05	2,375299	7,967	0,00917	0,00709
8	'1 4'	1,61E+05	6,91E+05	4,76E+04	2,325149	8,624	0,00880	0,00800
9	'1 4'	1,61E+05	6,91E+05	4,76E+04	2,325149	8,329	0,00880	0,00800
10	'2 4'	2,28E+05	1,00E+03	7,47E+05	2,373308	10,837	0,00914	0,00711
11	'2 4'	1,61E+05	6,91E+05	4,76E+04	2,325149	9,222	0,00880	0,00800
12	'2 4'	2,30E+05	1,00E+03	6,82E+05	2,372547	11,671	0,00911	0,00712
13	'2 4'	2,34E+05	1,02E+03	1,70E+05	2,355952	8,134	0,00885	0,00741
14	'2 4'	1,61E+05	6,91E+05	4,76E+04	2,325149	10,340	0,00880	0,00800
15	'2 4'	1,84E+05	1,00E+03	6,99E+05	2,375696	8,886	0,00924	0,00706
16	'2 4'	1,33E+05	5,51E+05	3,82E+04	2,321959	8,214	0,00889	0,00796
17	'2 4'	1,33E+05	5,51E+05	3,82E+04	2,321959	8,426	0,00889	0,00796
18	'3 4'	1,85E+05	1,00E+03	4,69E+05	2,371719	8,454	0,00917	0,00709
19	'3 4'	1,84E+05	1,00E+03	7,86E+05	2,376633	10,408	0,00925	0,00705
20	'3 4'	1,84E+05	1,00E+03	7,70E+05	2,376475	8,246	0,00925	0,00705
21	'4'	2,14E+05	7,59E+05	6,07E+04	2,341579	9,572	0,00853	0,00770
22	'4'	2,14E+05	7,59E+05	6,07E+04	2,341579	9,572	0,00853	0,00770
23	'4'	2,14E+05	7,59E+05	6,07E+04	2,341579	9,572	0,00853	0,00770
24	'4'	2,14E+05	7,59E+05	6,07E+04	2,341579	9,183	0,00853	0,00770
25	'4'	2,14E+05	7,59E+05	6,07E+04	2,341579	7,902	0,00853	0,00770
26	'4'	2,14E+05	7,59E+05	6,07E+04	2,341579	9,572	0,00853	0,00770
27	'4'	2,14E+05	7,59E+05	6,07E+04	2,341579	7,902	0,00853	0,00770
28	'4'	2,14E+05	7,59E+05	6,07E+04	2,341579	7,902	0,00853	0,00770
29	'4'	2,70E+05	1,00E+03	8,97E+04	2,367164	10,192	0,00904	0,00704
30	'4'	2,14E+05	7,59E+05	6,07E+04	2,341579	7,902	0,00853	0,00770
Média	Posição '4'	2,20E+05	6,83E+05	6,36E+04	2,344138	8,93	0,0086	0,0076
Desvio Padrão		1,77E+04	2,40E+05	9,17E+03	8,09E-03	9,15E-01	1,62E-04	3,09E-04
Coef. de Variação		8,08%	35,1%	14,4%	0,35%	10,3%	1,88%	4,04%

Quadro Ap.8 – Resultados da otimização AIMS – Caso 2.

DRP										ENG								
Análise	Posição	c (Ns/m)	k (N/m)	m _t (kg)	b (kg)	f _{obj}	t (s)	d1 (m)	d2 (m)	Posição	c (Ns/m)	k (N/m)	m _t (kg)	b (kg)	f _{obj}	t (s)	d1 (m)	d2 (m)
1	'1 2'	3,18E+05	6,00E+05	2,40E+03	9,26E+04	0,000509	8,343	0,01104	0,00819	'1 4'	2,95E+05	1,00E+03	2,40E+03	5,29E+05	4,46E+03	14,173	0,00860	0,00767
2	'1 3'	4,25E+05	1,00E+03	2,40E+03	5,64E+05	0,000614	12,406	0,00875	0,00802	'1 4'	2,52E+05	6,66E+05	2,40E+03	6,76E+04	3,99E+03	14,814	0,00821	0,00830
3	'1 4'	2,72E+05	5,19E+05	2,40E+03	8,38E+04	0,000512	8,960	0,00813	0,00813	'1 4'	2,52E+05	6,66E+05	2,40E+03	6,76E+04	3,99E+03	12,945	0,00821	0,00830
4	'1 4'	2,79E+05	4,81E+05	2,40E+03	8,87E+04	0,000512	9,063	0,00813	0,00813	'3'	4,13E+05	1,06E+06	1,23E+04	9,41E+04	4,21E+03	14,778	0,00851	0,00864
5	'1 4'	2,69E+05	5,34E+05	2,40E+03	8,32E+04	0,000512	11,365	0,00813	0,00813	'3'	4,13E+05	1,06E+06	1,23E+04	9,41E+04	4,21E+03	9,527	0,00851	0,00864
6	'2'	9,48E+05	1,19E+06	2,40E+03	1,95E+05	0,000602	9,007	0,00907	0,00903	'3'	4,13E+05	1,06E+06	1,23E+04	9,41E+04	4,21E+03	9,787	0,00851	0,00864
7	'2'	9,19E+05	1,34E+06	2,40E+03	1,88E+05	0,000602	8,996	0,00908	0,00901	'3'	4,13E+05	1,06E+06	1,23E+04	9,41E+04	4,21E+03	10,096	0,00851	0,00864
8	'2 4'	2,63E+05	1,00E+03	2,40E+03	4,43E+05	0,000567	8,057	0,00852	0,00780	'3'	4,13E+05	1,06E+06	1,23E+04	9,41E+04	4,21E+03	11,308	0,00851	0,00864
9	'3'	5,52E+05	1,73E+04	2,40E+03	1,83E+05	0,000547	7,406	0,00841	0,00841	'4'	2,87E+05	7,30E+05	3,28E+03	7,41E+04	3,94E+03	15,512	0,00821	0,00799
10	'4'	3,22E+05	6,86E+05	2,40E+03	9,25E+04	0,000509	9,424	0,00813	0,00787	'4'	2,87E+05	7,30E+05	3,28E+03	7,41E+04	3,94E+03	12,136	0,00821	0,00799
11	'4'	3,22E+05	6,78E+05	2,40E+03	9,22E+04	0,000509	10,271	0,00813	0,00787	'4'	2,87E+05	7,30E+05	3,28E+03	7,41E+04	3,94E+03	12,542	0,00821	0,00799
12	'4'	3,22E+05	1,00E+03	2,40E+03	9,22E+04	0,000567	10,267	0,00889	0,00733	'4'	2,87E+05	7,30E+05	3,28E+03	7,41E+04	3,94E+03	12,107	0,00821	0,00799
13	'4'	3,21E+05	5,93E+05	2,40E+03	9,22E+04	0,000509	8,470	0,00813	0,00787	'4'	2,87E+05	7,30E+05	3,28E+03	7,41E+04	3,94E+03	9,521	0,00821	0,00799
14	'4'	2,99E+05	7,33E+05	2,40E+03	9,22E+04	0,000513	7,795	0,00815	0,00795	'4'	2,87E+05	7,30E+05	3,28E+03	7,41E+04	3,94E+03	15,156	0,00821	0,00799
15	'4'	3,24E+05	5,76E+05	2,40E+03	9,28E+04	0,000509	8,059	0,00813	0,00787	'4'	2,87E+05	7,30E+05	3,28E+03	7,41E+04	3,94E+03	10,661	0,00821	0,00799
16	'4'	3,21E+05	7,02E+05	2,40E+03	9,28E+04	0,000513	12,348	0,00811	0,00803	'4'	2,87E+05	7,30E+05	3,28E+03	7,41E+04	3,94E+03	10,610	0,00821	0,00799
17	'4'	3,23E+05	5,85E+05	2,40E+03	9,28E+04	0,000509	7,574	0,00813	0,00788	'4'	2,87E+05	7,29E+05	3,05E+03	7,42E+04	3,94E+03	9,618	0,00821	0,00798
18	'4'	2,98E+05	5,00E+05	2,40E+03	9,35E+04	0,000553	7,669	0,00870	0,00743	'4'	2,87E+05	7,30E+05	3,28E+03	7,41E+04	3,94E+03	10,045	0,00821	0,00799
19	'4'	3,00E+05	5,73E+05	2,40E+03	9,28E+04	0,000509	8,870	0,00813	0,00788	'4'	2,87E+05	7,30E+05	3,28E+03	7,41E+04	3,94E+03	14,419	0,00821	0,00799
20	'4'	3,20E+05	6,88E+05	2,40E+03	9,41E+04	0,000509	11,760	0,00813	0,00788	'4'	2,87E+05	7,30E+05	3,28E+03	7,41E+04	3,94E+03	10,661	0,00821	0,00799
21	'4'	3,21E+05	5,00E+05	2,42E+03	9,39E+04	0,000516	9,248	0,00822	0,00781	'4'	2,87E+05	7,30E+05	3,28E+03	7,41E+04	3,94E+03	10,661	0,00821	0,00799
22	'4'	3,21E+05	5,90E+05	2,40E+03	9,35E+04	0,000509	10,305	0,00813	0,00788	'4'	2,87E+05	7,30E+05	3,28E+03	7,41E+04	3,94E+03	10,369	0,00821	0,00799
23	'4'	3,20E+05	6,95E+05	2,40E+03	9,30E+04	0,000509	9,542	0,00813	0,00788	'4'	2,87E+05	7,30E+05	3,28E+03	7,41E+04	3,94E+03	10,057	0,00821	0,00799
24	'4'	3,20E+05	6,85E+05	2,40E+03	9,31E+04	0,000509	9,145	0,00813	0,00787	'4'	2,87E+05	7,30E+05	3,28E+03	7,41E+04	3,94E+03	14,055	0,00821	0,00799
25	'4'	3,02E+05	5,81E+05	2,40E+03	9,30E+04	0,000509	10,213	0,00813	0,00788	'4'	2,87E+05	7,30E+05	3,28E+03	7,41E+04	3,94E+03	13,642	0,00821	0,00799
26	'4'	3,20E+05	6,03E+05	2,40E+03	9,28E+04	0,000509	9,693	0,00813	0,00788	'4'	2,87E+05	7,30E+05	3,28E+03	7,41E+04	3,94E+03	9,842	0,00821	0,00799
27	'4'	3,02E+05	6,91E+05	2,40E+03	9,35E+04	0,000509	10,999	0,00813	0,00787	'4'	2,87E+05	7,30E+05	3,28E+03	7,41E+04	3,94E+03	9,763	0,00821	0,00799
28	'4'	3,03E+05	6,81E+05	2,40E+03	9,30E+04	0,000509	11,920	0,00813	0,00788	'4'	2,87E+05	7,30E+05	3,28E+03	7,41E+04	3,94E+03	9,963	0,00821	0,00799
29	'4'	3,20E+05	6,93E+05	2,40E+03	9,28E+04	0,000511	10,661	0,00813	0,00791	'4'	2,87E+05	7,30E+05	3,28E+03	7,41E+04	3,94E+03	10,427	0,00821	0,00799
30	'4'	3,20E+05	6,85E+05	2,40E+03	9,28E+04	0,000509	10,059	0,00813	0,00787	'4'	2,87E+05	7,30E+05	3,28E+03	7,41E+04	3,94E+03	10,661	0,00821	0,00799
Média		3,20E+05	6,03E+05	2,40E+03	9,28E+04	0,000515	9,73	0,0082	0,0078		2,87E+05	7,30E+05	3,27E+03	7,41E+04	3,94E+03	11,47	0,0082	0,0080
Desvio Padrão	Posição	2,08E+04	2,36E+05	4,07E+00	7,15E+02	1,53E-05	1,38E+00	2,02E-04	1,58E-04	Posição	4,88E-01	3,71E+02	4,97E+01	1,14E+01	6,33E-03	1,91E+00	7,45E-07	2,23E-06
Coef. de Variação	'4'	6,50%	39,1%	0,17%	0,77%	2,98%	14,2%	2,46%	2,01%	'4'	0,00%	0,05%	1,52%	0,02%	0,00%	16,7%	0,01%	0,03%

ACL									
Análise	Posição	c (Ns/m)	k (N/m)	m _t (kg)	b (kg)	f _{obj}	t (s)	d1 (m)	d2 (m)
1	'1 3'	2,74E+05	1,00E+03	2,40E+03	8,11E+05	2,467592	11,365	0,00813	0,00813
2	'1 3'	3,95E+05	1,00E+03	7,84E+04	2,00E+05	2,309345	7,795	0,00815	0,00795
3	'1 3'	2,78E+05	1,00E+03	6,16E+04	9,43E+05	2,358139	8,870	0,00813	0,00788
4	'1 3'	4,02E+05	1,00E+03	8,08E+04	1,97E+05	2,309548	10,999	0,00813	0,00787
5	'1 3'	3,13E+05	1,00E+03	6,81E+04	4,18E+05	2,332695	10,059	0,00813	0,00787
6	'1 4'	2,14E+05	5,93E+03	5,00E+04	4,85E+05	2,309252	8,343	0,01017	0,01238
7	'1 4'	1,71E+05	7,29E+05	2,40E+03	4,88E+04	2,344482	8,470	0,00813	0,00787
8	'1 4'	2,21E+05	1,06E+03	4,13E+04	7,75E+05	2,303623	10,661	0,00813	0,00791
9	'2'	8,29E+05	1,00E+03	9,20E+03	2,62E+05	2,284030	12,406	0,00875	0,00802
10	'2'	7,82E+05	1,00E+03	9,20E+03	2,97E+05	2,281934	8,960	0,00813	0,00813
11	'2'	8,15E+05	1,00E+03	9,20E+03	2,68E+05	2,283321	9,063	0,00813	0,00813
12	'2'	5,49E+05	1,00E+03	9,20E+03	9,28E+05	2,335840	9,424	0,00813	0,00787
13	'2'	7,75E+05	1,00E+03	9,20E+03	2,96E+05	2,281982	10,267	0,00889	0,00733
14	'2'	8,09E+05	1,00E+03	9,20E+03	2,73E+05	2,282848	7,574	0,00813	0,00788
15	'2'	8,07E+05	1,00E+03	9,20E+03	2,77E+05	2,282552	11,760	0,00813	0,00788
16	'2'	6,62E+05	1,00E+03	9,20E+03	4,55E+05	2,295795	9,248	0,00822	0,00781
17	'2'	8,40E+05	1,00E+03	9,20E+03	2,82E+05	2,283099	9,693	0,00813	0,00788
18	'2'	7,05E+05	1,01E+03	9,20E+03	3,48E+05	2,284875	11,920	0,00813	0,00788
19	'2 4'	2,29E+05	5,40E+04	4,13E+04	1,48E+05	2,222299	8,996	0,00908	0,00901
20	'2 4'	2,29E+05	5,40E+04	4,13E+04	1,48E+05	2,222299	7,669	0,00870	0,00743
21	'2 4'	1,91E+05	1,00E+03	3,53E+04	4,19E+05	2,238089	9,145	0,00813	0,00787
22	'2 4'	2,29E+05	5,40E+04	4,13E+04	1,48E+05	2,222299	10,213	0,00813	0,00788
23	'3'	8,31E+05	1,00E+03	1,20E+05	2,67E+05	2,283555	8,057	0,00852	0,00780
24	'4'	2,79E+05	1,00E+03	1,11E+04	8,17E+05	2,353708	9,007	0,00907	0,00903
25	'4'	2,54E+05	8,31E+05	9,77E+03	6,76E+04	2,324164	7,406	0,00841	0,00841
26	'4'	2,82E+05	1,00E+03	1,10E+04	5,99E+05	2,350689	10,271	0,00813	0,00787
27	'4'	2,94E+05	1,00E+03	9,91E+03	2,12E+05	2,338962	8,059	0,00813	0,00787
28	'4'	3,04E+05	1,00E+03	1,00E+04	2,19E+05	2,339490	12,348	0,00811	0,00803
29	'4'	2,54E+05	8,31E+05	9,77E+03	6,76E+04	2,324164	10,305	0,00813	0,00788
30	'4'	2,54E+05	8,31E+05	9,77E+03	6,76E+04	2,324164	9,542	0,00813	0,00788
Média		7,57E+05	1,00E+03	9,20E+03	3,69E+05	2,289628	10,03	0,0083	0,0079
Desvio Padrão	Posição	9,22E+04	4,05E+00	5,90E-01	2,05E+05	1,67E-02	1,54E+00	2,89E-04	2,25E-04
Coef. de Variação	'2'	12,2%	0,40%	0,00%	55,5%	0,73%	15,4%	3,49%	2,85%