

# 1 INTRODUÇÃO.

## 1.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS.

A destruição causada por eventos sísmicos tem demonstrado a necessidade e urgência de mitigar os efeitos de tais eventos naturais nas estruturas. A filosofia dos códigos sísmicos é a de salvar vidas, requerendo que as estruturas sejam projetadas de tal forma que qualquer colapso parcial ou total seja evitado em caso de grandes terremotos. Além disso, diversas estruturas devem garantir a proteção dos seus conteúdos como hospitais, plantas nucleares, laboratórios, e outros lugares que tenham equipamentos sensíveis a movimentos com altas velocidades e acelerações, ou materiais com alto poder de contaminação.

Um dos maiores desafios que enfrentam hoje em dia os engenheiros estruturais é o de encontrar meios mais eficazes para proteger as estruturas e seus conteúdos dos efeitos prejudiciais dos terremotos. A idéia de usar um sistema de controle para a dissipação, neutralização ou isolamento da energia de vibração é identificada como uma abordagem promissora. Nos últimos anos, estruturas inteligentes têm sido adotadas em muitos campos da engenharia. Nestes casos, o desempenho do sistema estrutural pode ser melhorado sem qualquer aumento significativo da massa da estrutura e sem a exigência de um alto consumo de energia para o controle de vibração.

A filosofia dos códigos sísmicos pode ser alcançada através de isolamento de base, que é uma tecnologia avançada usada em projetos sismo-resistentes. Isolamento com blocos de borracha, com baixa rigidez horizontal, localizados entre as colunas e a fundação prolonga o período da estrutura, e, portanto, reduzem as acelerações e os deslocamentos entre andares. Um desafio que as estruturas de isolamento podem enfrentar é a de estarem localizadas perto das falhas geológicas associadas a terremotos que contêm períodos longos, pulsos de velocidade que podem coincidir com o período da estrutura da base isolada,

resultando em uma excessiva deformação e uma possível ruptura dos isoladores (Alhan e Altun, 2009).

Entretanto, isolamento de base tem se mostrado uma das mais bem sucedidas técnicas para edifícios sob fortes terremotos. O efeito benéfico destes tipos de apoios é que a força de restituição e a adequada capacidade de amortecimento podem ser obtidas a partir de um dispositivo simples. Embora eles sejam frequentemente modelados de forma linear na prática na engenharia, como indicam alguns códigos, as características dinâmicas destes dispositivos são em geral altamente não lineares. Assim, uma teoria linear pode levar a uma representação errônea da resposta dinâmica.

O conceito fundamental dos sistemas de isolamento de base está fundamentado em desacoplar a estrutura do edifício dos componentes nocivos do movimento de terremoto (dado de entrada) pela introdução de uma interface flexível entre a estrutura e sua fundação. Desta forma, limita-se a magnitude da força a ser transmitida à superestrutura e, portanto, a demanda estrutural diminui.

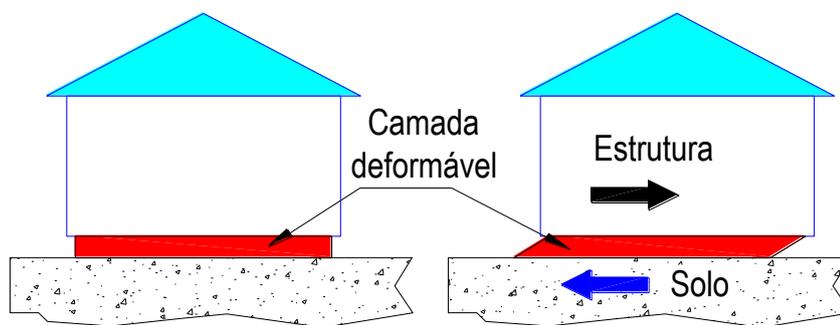
A eficiência do sistema de isolamento depende da relação entre o espectro de frequências da estrutura (que é modificado pelo isolamento de base) e o conteúdo de frequências do sismo, que não é conhecido *a priori*. Assim o conhecimento dos períodos naturais da estrutura e do material de fundação e uma avaliação correta das mudanças do período são parte importante da análise sísmica. Essa mudança do período pode afastar a estrutura da região com maior conteúdo de períodos característicos do sismo, ou contrariamente, colocar o sistema estrutural em condições de ressonância.

Se a primeira frequência natural da base do edifício isolado está próxima da frequência de um sistema estrutural constituído por superestruturas rígidas montadas sobre isoladores flexíveis de base, o edifício isolado tende a se comportar globalmente como um corpo rígido, e todos os processos de deformação ficam predominantemente localizados nas camadas de isolamento. (Dinu, 2008).

Embora o conceito de isolamento sísmico seja simples e a sua eficácia comprovada, a idéia de isolar os edifícios das suas fundações não foi, e ainda continua não sendo aceita pelos engenheiros de alguns países. Uma das objeções principais à utilização deste tipo de sistemas tem sido a falta de regulamentação adequada, que enquadre e defina a forma de aplicação desta tecnologia. Outra

objeção é o eventual aumento de custo da estrutura devido ao preço do sistema de isolamento de base. Mesmo sendo verdade este fato, não deve ser esquecido que com esta tecnologia é possível atingir elevados níveis de segurança em relação á ação sísmica com estruturas mais baratas em função da diminuição dos esforços na estrutura durante um terremoto (sem considerar o custo dos dispositivos de isolamento). (Guerreiro, 2004)

A Figura 1.1 ilustra a aplicação do conceito de isolamento de base mostrando a camada flexível de baixa rigidez, que separa a estrutura com a fundação das componentes horizontais do movimento do solo, e sua deformação na presença de um deslocamento de base.

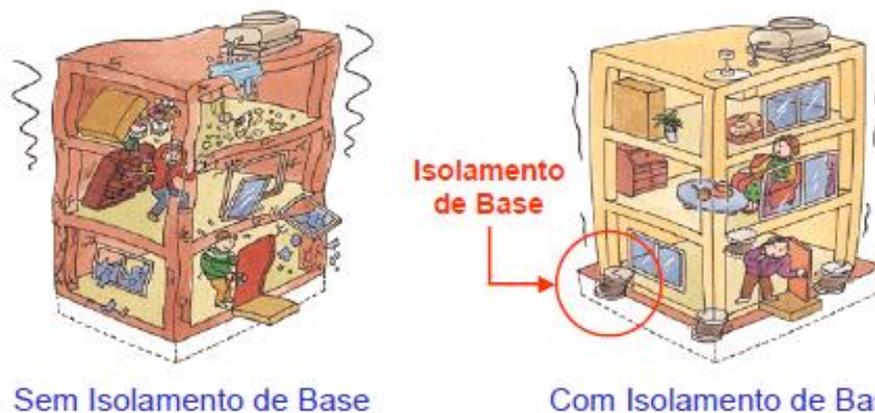


**Figura 1.1 Camada deformável que leva à redução da frequência própria de vibração. (Guerreiro, 2006).**

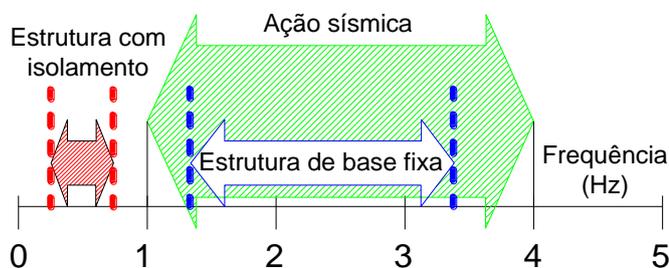
A Figura 1.2 mostra uma estrutura com isolamento de base, onde os deslocamentos horizontais concentram-se no nível da camada de isolamento e o restante da estrutura quase não se deforma, comportando-se como um corpo rígido.

A Figura 1.3 mostra as faixas usuais das frequências de excitação das ações sísmicas com maior conteúdo energético, da primeira frequência natural da estrutura com base fixa e da estrutura com isolamento de base (Guerreiro, 2006).

## Aumentam os deslocamentos, mas não a deformação



**Figura 1.2** Diferença de respostas dos edifícios com e sem isolamento de base. (Guerreiro, 2006).



**Figura 1.3** Intervalo usual das frequências de excitação das ações sísmicas com maior conteúdo energético, e faixa de frequências próprias da estruturas de base fixa e isolada (Guerreiro, 2006).

Recentemente tem-se estudado a eficiência do isolamento de base usando amortecedores magnetoreológicos ou eletroreológicos. Fluido magnetoreológico (MR) e eletroreológico (ER) são fluidos capazes de mudar suas propriedades reológicas quando submetidos a um campo elétrico ou magnético, respectivamente. Trata-se de soluções coloidais formadas por partículas polarizáveis ou magnetizáveis misturadas com um óleo inerte, geralmente a base de mineral ou de silicone (Torstem e Stryk, 1999), (Carlson e Sproston, 2000), (Milecki, 2001), e (Oh, Onada, 2002). Podem ser acrescentados aditivos para evitar efeitos com a aglomeração e a precipitação. Quando um fluido magnetoreológico é submetido a um campo magnético, suas partículas começam a formar cadeias orientadas na direção do campo. Quanto mais forte o campo, maior será o número de partículas a formar estas cadeias, até que ocorra saturação. Quando é exercida uma força sobre o fluido e este tende a escoar, estas partículas dificultam o escoamento do fluido, alterando assim sua viscosidade aparente. O

fluido MR foi desenvolvido por Rabinow e Winslow no fim da década de 40. (Giovanni, 2003), sendo sua versão original tão eficiente quanto os atuais (Carlson, 2001).

Os amortecedores com fluidos MR possibilitam a criação de sistemas de controle de vibração ativos, passivos e híbridos (semi-ativos), fundamentados no nível de energia requerida e no tipo de controle desejado. Entre estes sistemas, a abordagem semiativa tem recebido considerável atenção, porque oferece capacidade de adaptação significativa dos sistemas ativos sem requerimentos de grande quantidade de energia e é confiável como sistema passivo.

Em particular, amortecedores MR podem ser projetado de forma eficaz para trabalhar como atuadores no controle de vibração. Em engenharia civil, aplicações com amortecedores MR são principalmente centradas no controle de vibração de estruturas sob excitações de vento ou terremotos. A indústria automotiva tem se interessado no desenvolvimento de aplicações destes materiais, como, por exemplo, montagens de motores, embreagens e dispositivos de amortecedores.

Amortecedores magnetoreológicos são dispositivos de comportamento não linear devido às características inerente à histerese do amortecimento.

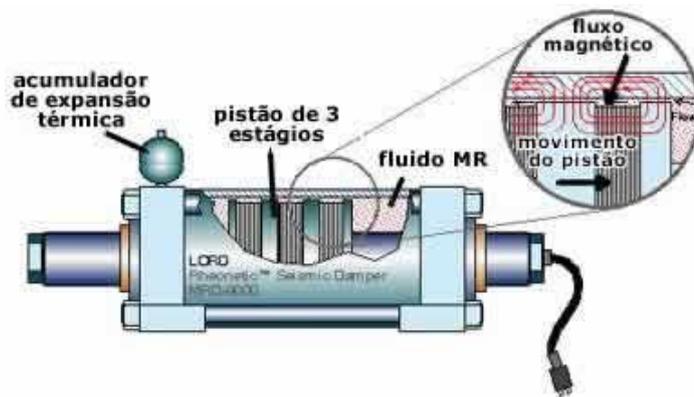
Um amortecedor MR consiste de um cilindro hidráulico, bobina magnético, e fluido MR que consiste de partículas de micro-tamanhos flutuando em um fluido tipo óleo, como mostrado na Figura 1.4. Figura 1.4 Protótipo de um amortecedor MR de 20 toneladas (Yang, et al. 2002)

O amortecedor MR é operado como um amortecedor passivo; porém, quando o campo magnético é variado, o fluido MR se transforma num dispositivo semi-ativo em poucos milissegundos. Suas principais características são resumidas a seguir. (Kim, et al 2009).

1. Um amortecedor MR é operado com fontes de baixa potência, por exemplo, o amortecedor DS-1000 pode gerar uma força de até 3000 N usando uma pequena bateria com capacidade inferior a 10 W.
2. Sua tensão máxima de escoamento está além de 80 kPa.
3. O funcionamento é estável em uma ampla faixa de temperatura, por exemplo, fluidos MR operam com temperaturas entre -40 e 150 °C.
4. O tempo de resposta é de alguns milissegundos.

5. O funcionamento não é suscetível a contaminação durante a fabricação do amortecedor MR. Além disso, o ponto de operação deste pode ser mudado por um ímã permanente.

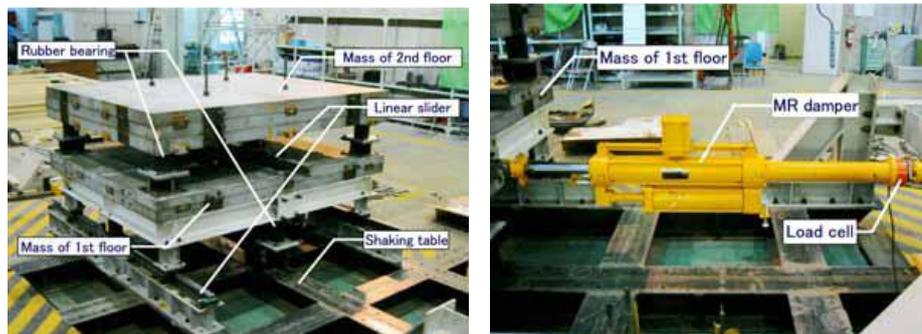
Para utilizar plenamente as melhores características do amortecedor MR, um modelo matemático que retrate o comportamento não linear do amortecedor MR tem que ser desenvolvido. No entanto este é um desafio porque o amortecedor MR é um dispositivo altamente não linear. Um modelo que é numericamente tratável e foi usado extensamente para modelagem de ciclos de histerese é o modelo de Bouc-Wen (Wen, 1976). O modelo Bouc-Wen é extremamente versátil e é capaz de representar uma ampla variedade de comportamentos de histerese.



**Figura 1.4 Protótipo de um amortecedor MR de 20 toneladas (Yang, et al. 2002)**

Várias são as pesquisas sobre o controle de vibrações em edifícios com amortecedores MR causadas por ações ambientais, como o vento e, principalmente, terremotos, incluindo estudos analíticos, experimentais, ou simulações computacionais.

Por exemplo, Inoue, et al, analisaram experimentalmente uma estrutura de dois andares e  $4m^2$  de área tendo entre o primeiro andar e a mesa vibratória quatro isoladores tipo borracha e no segundo dois isoladores. O amortecedor MR foi instalado entre o primeiro andar e a mesa de vibrações. A estrutura foi submetida a movimento de base unidirecional na mesa de vibrações do laboratório de estruturas do Building Research Institute (Japão). O controle da força do amortecedor foi feito pelo método *gain-scheduled*. O experimento é mostrado na Figura 1.5



**Figura 1.5 Configuração experimental e instalação de amortecedor MR. (Inoue, et al).**

Yoshioka et al. (2002) desenvolveram um estudo experimental com um sistema de isolamento de base inteligente, utilizando amortecedor MR. A estrutura experimental foi construída e analisada no Structural Dynamics and Control/Earthquake Engineering Laboratory da University of Notre Dame.

Kanno, et al. (2008) estudaram experimentalmente três tipos de controladores semiativos em uma estrutura de aço de um andar utilizando amortecedores MR que foram instaladas entre a mesa vibratória e a estrutura. O sistema foi submetido a movimento de base unidirecional em uma mesa vibratória no laboratório Architecture and Building Science da Tohoku University, Japão.

Bharti et al. (2010) estudaram a resposta dinâmica de dois edifícios adjacentes de diferentes características dinâmicas ligados rigidamente por meio de amortecedores MR. Os pisos de ambos os edifícios estão no mesmo nível, e as alturas são diferentes. Ambas as estruturas foram submetidas a movimento de base unidirecional.

Allotta et al. (2010), com a finalidade de melhorar o desempenho do trem da Ansaldo-Breda na Holanda (aumento da velocidade e conforto dos passageiros), desenvolveram um modelo de EF para estudar o comportamento altamente não newtoniano do fluido magnetoreológico.

Zhou, et al. (2006), analisaram o controle semi-ativo de vibrações usando amortecedores MR de um cabo inclinado para manter estável a estrutura e reduzir as vibrações do cabo simultaneamente tanto no plano quanto fora do plano. O método das diferenças finitas (FDM) foi usado no estudo numérico.

Outros pesquisadores trabalharam no desenvolvimento de algoritmos para variação da voltagem aplicada ao amortecedor MR para gerar a força de controle. Por exemplo, Boada, *et al* (2011) desenvolveram um método de aprendizagem

recursivo baseado em redes neurais, onde fizeram a modelagem do comportamento do amortecedor MR. Eles mostraram que o aprendizado é rápido e que é fácil selecionar a estrutura da rede e calcular os parâmetros do modelo, obtendo boa correlação entre resultado numéricos e os dados obtidos experimentalmente.

Em geral todos os trabalhos feitos por pesquisadores visam à proteção da estrutura e seus conteúdos. Esta é atingida com a minimização das deformações e acelerações nas estruturas.

## **1.2. OBJETIVO E CONSIDERAÇÕES DO TRABALHO.**

Em torres e edifícios, sistemas de controle passivos ou semi-ativos têm sido usados para reduzir as vibrações induzidas por ventos ou terremotos. Nos últimos anos tem-se dado grande atenção ao uso de amortecedores puramente não lineares nestas estruturas, em particular amortecedores magnetoreológicos. Em virtude da presença do amortecedor, o sistema dinâmico se torna não-linear dando origem a diversos fenômenos não-lineares. O objetivo desta dissertação de mestrado é investigar a influência de um amortecedor MR nas vibrações de um edifício submetido a um movimento de base, com ênfase na excitação sísmica. Desenvolve-se um estudo paramétrico com a finalidade de se entender a influência dos diversos parâmetros envolvidos na análise (amortecedor e estrutura) na redução dos deslocamentos, acelerações e esforços da estrutura.

## **1.3. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO**

A presente dissertação encontra-se organizada em sete capítulos, a saber:

No capítulo I, apresenta-se a introdução do trabalho.

No capítulo II, apresentam-se os fundamentos teóricos do amortecedor magnetoreológico e suas propriedades dinâmicas.

No capítulo III, apresentam-se inicialmente a formulação das equações diferenciais de movimento para um edifício de  $n$  andares modelados como um sistema discreto de  $n$  graus de liberdade (shear frame) considerando movimento de base e a presença de um amortecedor MR. A seguir, apresentam-se as equações de uma torre esbelta modelada como um pêndulo múltiplo.

No capítulo IV, apresentam-se os fundamentos teóricos e a formulação matemática para gerar sismos artificiais.

No capítulo V, apresenta-se a análise numérica de uma estrutura de três andares sujeita a movimento de base, sem e com controle de vibrações com amortecedores MR localizado no primeiro andar e na fundação.

No capítulo VI, apresenta-se a análise numérica de uma torre sujeita a movimento de base, sem e com controle de vibrações com amortecedores MR localizado no primeiro andar e na fundação.

Finalmente, no capítulo VII, apresentam-se as conclusões e sugestões para trabalhos futuros.