

ANÁLISE EXPERIMENTAL EM MODELO REDUZIDO DO EFEITO DE ABSORVEDOR PASSIVO EM ESTRUTURA

André da Silva Rodrigues

Bacharelado do Curso de Engenharia Civil da UniEVANGÉLICA (andresilvarod@gmail.com)

Bruno Yuri Moribayashi Marques

Bacharelado do Curso de Engenharia Civil da UniEVANGÉLICA (brunoyuri2001@hotmail.com)

Guilherme de Castro Xavier

Bacharelado do Curso de Engenharia Civil da UniEVANGÉLICA (guilhermedecastro2210@outlook.com)

Katiany Bastos Rocha

Bacharelada em Engenharia Civil, UniEVANGÉLICA (katianyrocha23@hotmail.com)

Agnaldo Antonio Moreira Teodoro da Silva

*Professor Mestre do Curso de Engenharia Civil da UniEVANGÉLICA
(agnaldo.silva@docente.unievangelica.edu.br)*

RESUMO

Diante de uma conjuntura onde presencia-se várias situações envolvendo edificações submetidas à problemáticas advindas das patologias causadas por vibrações nas estruturas, surge a necessidade de criar soluções que minimizem os efeitos gerados por elas. O Amortecedor de Coluna de Líquido Sintonizado, comumente chamado na literatura TLCD (*Tuned Liquid Column Damper*), aparece como uma opção e mostra-se eficaz quanto a sua utilização no alto das edificações. Tal como um reservatório, atua como um amortecedor, no qual recebe as vibrações vindas da estrutura através do seu líquido interior, que é agitado de forma que dissipe a energia causada por elas e, conseqüentemente, preserva a estabilidade da edificação e sua estrutura. Este trabalho visou analisar os resultados e a aplicabilidade do TLCD em prédios e edificações sujeitas às vibrações, por meio da demonstração prática em um modelo reduzido. Existem, hoje, diversos estudos que buscam avaliar a eficiência dos absorvedores de coluna de líquido na mitigação de vibrações. Para tanto, há uma dificuldade no que diz respeito aos testes físicos, pois a aplicação em edifícios já construídos torna a pesquisa muito onerosa. Dessa forma, surge a necessidade de avaliar o comportamento dos TLCD's em modelos reduzidos. O presente estudo visa apresentar os principais conceitos e experimentos realizados, no que diz respeito ao uso de absorvedores passivos, bem como sua evolução ao longo dos anos. Os resultados obtidos demonstram a eficácia do método utilizado para mitigação das vibrações no modelo reduzido e teoricamente também para o modelo real, atuando diretamente na integridade da edificação e conforto do usuário.

PALAVRAS-CHAVE: TLCD; vibrações; reservatório; patologias.

1 INTRODUÇÃO

Uma estrutura pode sofrer impactos devido às diversas ações externas em que for submetida, como atividades sísmicas, temporais, até mesmo à ação do vento ou por outras fontes de vibração. Sendo assim, surge a necessidade de encontrar uma solução para minimizar qualquer dano que possa vir a ocorrer e como efeito, melhorar o conforto e segurança dos usuários.

Logo, tornar a estrutura totalmente rígida não resultará positivamente, pois, quanto mais rígida, maior a energia absorvida, que será dissipada pela própria estrutura por meio de movimento, uma vez que, qualquer corpo que se movimenta libera energia. Como solução, o Amortecedor de Coluna de Líquido Sintonizado (TLCD) destaca-se por sua particularidade de ser um reservatório em forma de “U”, atuando diretamente na absorção das vibrações quando solicitado, por meio da sintonia do líquido em seu interior.

Esse sistema mostra-se eficiente e prático quando observada a possibilidade de ser utilizado tanto como mitigador passivo de vibrações, quanto como reservatório, o que faz com que não sejam necessárias estruturas, custos, manutenções e ocupação de espaço além do usual de um reservatório comum.

Contudo, é notória a dificuldade para implementação de testes físicos em edifícios já executados, devido ao custo elevado para realização. Portanto, há necessidade da criação de soluções viáveis economicamente para tal problemática, resumindo-se na elaboração de modelos reduzidos, tal como o que será abordado neste estudo para simulação dos sistemas dos TLCD's.

Por esta razão, é perceptível que a falta de estudos ocasiona a deficiência de conhecimentos, fazendo com que possuam poucas soluções até o momento, e com estas, os valores são elevados para sua aplicabilidade. Alinhados à esta perspectiva e compreendendo os impactos causados pelas mudanças climáticas, assim como o quanto podem afetar a estrutura dos edifícios, tem-se como objetivo, encontrar um modelo prático e econômico, que ao ser submetido às grandes vibrações será capaz de reduzir as respostas estruturais da edificação.

2 SISTEMAS DE CONTROLE

Em vista do contexto mencionado, é notável a necessidade da criação de métodos que possam solucionar ou amenizar as vibrações causadas nos edifícios. Vibrações essas, que podem ser provocadas principalmente por ações variáveis ou excepcionais, como cargas verticais de uso da construção, efeitos causados pela ação do vento, chuva ou por abalos sísmicos.

Dessa forma, os sistemas de controle apresentam diferentes mecanismos atenuadores de vibrações, que se aplicam em variadas situações de acordo com o desempenho e eficácia esperada. Para isso, devem ser analisadas questões como custo-benefício, longevidade do sistema e periodicidade de manutenções.

Sendo assim, os sistemas de controle podem ser classificados de acordo com seu uso, sendo eles: controle passivo, controle ativo, controle semiativo ou controle híbrido.

2.1 CONTROLE PASSIVO

O mecanismo de controle passivo é caracterizado por não requerer fontes de potência externa para o seu uso, sendo assim, sua aplicação se fundamenta à implementação de um ou mais dispositivos inseridos na estrutura, com objetivo de dissipar

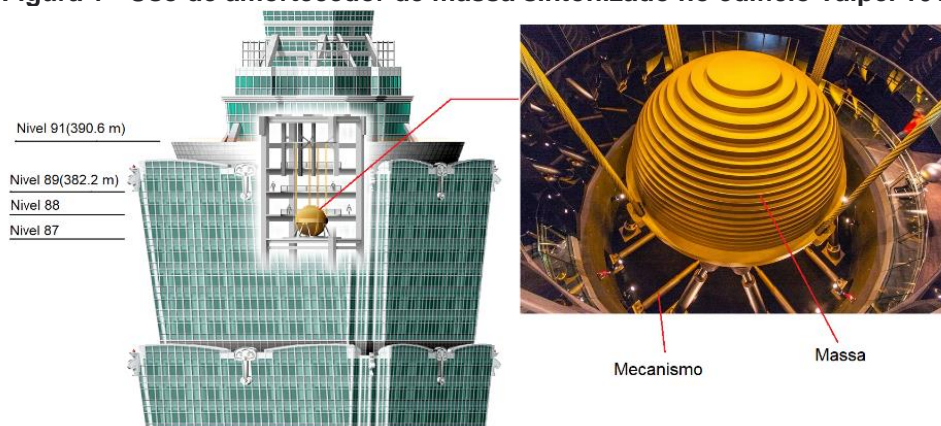
a energia resultante das ações externas, à fim de mitigar os efeitos causadores das vibrações nos elementos relevantes da estrutura.

Dentre as aplicações do sistema de controle passivo, os métodos mais utilizados são isolamento de base, amortecedores metálicos, amortecedores de fricção, amortecedores viscoelásticos, amortecedores viscofluídos, amortecedores de massa sintonizados e amortecedores de líquidos sintonizados.

Entre as vantagens contidas nesse sistema, inclui-se a fácil implementação, não necessitando de mão de obra altamente especializada e de equipamentos otimizados que necessitam de uma tecnologia avançada para sua aplicação. Tais características possibilitam o seu implemento em estruturas já executadas, o que justifica a conjuntura de ser um dos mecanismos de controle mais utilizados no país.

A Figura 1 ilustra o uso do amortecedor de massa sintonizado em um dos edifícios mais altos do mundo, Taipei 101, localizado na capital de Taiwan, Taipé. No núcleo do edifício, um amortecedor de 660 toneladas fica suspenso no 92º para 87º andar, o que neutraliza os efeitos dos ventos fortes. O princípio é promover um deslocamento lateral na direção oposta ao deslocamento lateral do edifício, através da criação de uma força de inércia em sentido contrário, garantindo o comportamento desejado (IGLESIA, 2018).

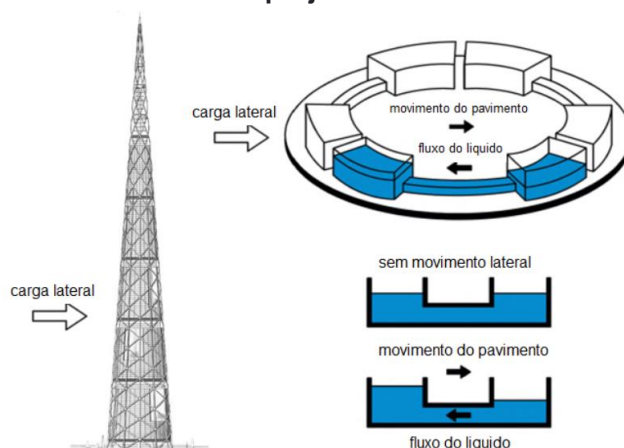
Figura 1 - Uso de amortecedor de massa sintonizado no edifício Taipei 101.



Fonte: Comunidade AltoQI (2018).

A figura 2 ilustra o uso do amortecedor de líquido sintonizado no projeto Millenium Tower, o qual possui como objetivo promover uma força de inércia contrária a ação externa, garantindo o comportamento estrutural pretendido (IGLESIA, 2018).

Figura 2 - Uso de amortecedor de líquido sintonizado no projeto Millenium Tower



Fonte: Comunidade AltoQI (2018)

2.2 CONTROLE ATIVO

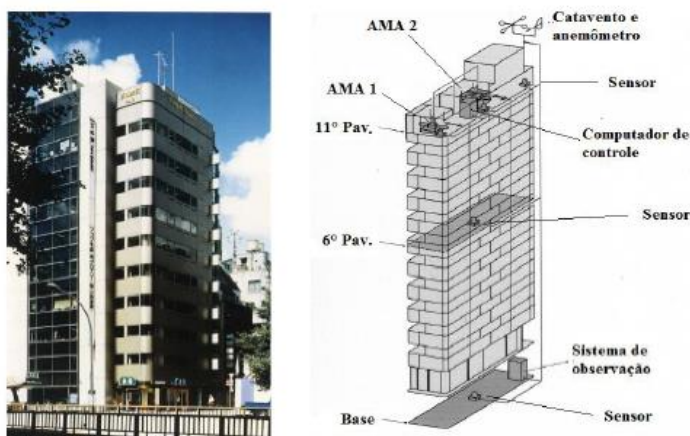
O sistema de controle pelo método ativo é caracterizado pela aplicação de forças secundárias em pontos estratégicos da estrutura, resultantes de um conjunto de dados fornecidos por sensores localizados na mesma, capazes de medir a intensidade da vibração na estrutura e a força de resposta necessária para reduzi-la. Esses conjuntos de dados são gerados por controladores alimentados por fontes de potência externa.

Tais características justificam o fato de o sistema possuir um custo significativamente mais alto quando comparado ao sistema de controle passivo, necessitando de fontes de energia confiáveis que assegurem a funcionabilidade do sistema em casos de quedas do fornecimento na região, assim como a alta demanda de energia requerida para a produção das forças de controle. Conseqüentemente, diferenciando-se do sistema de controle passivo, é um sistema que requer uma mão de obra altamente qualificada e manutenção do dispositivo.

Em contrapartida, o sistema possui diversas vantagens que justificam o fato do alto custo do sistema, entre elas, um controle maior da estrutura possibilitado pelos sensores inseridos nela, em que, diante de ações variáveis ou excepcionais (cargas verticais de uso da construção, efeitos causados pela ação do vento, chuva ou por abalos sísmicos) possibilitam respostas mais eficientes para cada situação e objetivo planejado.

A Figura 3 ilustra um dos primeiros edifícios onde foi implementado o sistema de controle ativo, localizado no edifício Kyobashi-Seiwa pela Corporação Kajima em 1989. Para esse caso, foram instalados dois amortecedores de massa ativos (AMA) no topo do edifício para amenizar as vibrações transversais e torcionais (YANG, 2001). Devido a sua elevada esbelteza, o edifício é bastante exposto à ação externas, como ventos.

Figura 3 - Sistema de controle ativo: à esquerda o Edifício Kyobashi-Seiwa e à direita uma ilustração do sistema de controle



Fonte: Adaptativa de YANG (2001).

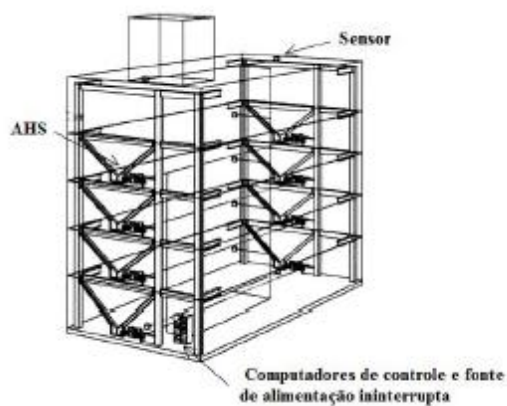
2.3 CONTROLE SEMIATIVO

O método de controle semiativo é caracterizado por possuir propriedades que podem ser modificadas ou variadas dinamicamente utilizando a própria energia externa, como amortecimento e rigidez. Porém, o mecanismo se difere do sistema de controle ativo pelo fato de que a alteração das propriedades através dos dispositivos não é realizada introduzindo energia mecânica ao sistema estrutural, mas produzindo efeitos de absorção das excitações providas da estrutura, podendo ser considerado um “sistema de dispositivos passivos controláveis”.

Diante disso, o sistema possibilita algumas vantagens, entre elas, um menor custo quando comparado ao sistema de controle ativo. Tal fato justifica-se pela menor demanda de energia de elevada magnitude necessária para execução, uma vez que não é adicionada energia ao sistema, surgindo como opção a utilização de baterias de emergência em casos especiais de queda de energia, possibilitando a continuidade do funcionamento do sistema. São exemplos desse mecanismo: amortecedor de orifício variável, amortecedor de líquido controlável e dispositivo de controle da variação da rigidez.

A figura 4 mostra a aplicação deste mecanismo através de Amortecedores Hidráulicos Semiativos (AHS) no Edifício Kajima Shizuoka, Shizuoka, Japão. O edifício possui 5 andares, compostos por escritórios, onde sua estrutura foi feita em aço. Cada amortecedor desse edifício é capaz de produzir uma força máxima de 1000kN (YANG, 2001).

Figura 4 – Sistema de controle semiativo: à esquerda o Edifício Kajima Shizuoka e à direita ilustração do respectivo sistema de controle



Fonte: Adaptativa de YANG (2001)

2.4 CONTROLE HÍBRIDO

O sistema de controle híbrido é caracterizado por ser uma espécie de junção entre o mecanismo passivo e ativo. A principal característica consiste em possuir controladores híbridos, os quais podem ser programados para que sua fração ativa entre em ação apenas quando a resposta da estrutura excede a capacidade de dissipação de energia da parcela passiva.

Diante dessas circunstâncias, o método de controle híbrido apresenta algumas vantagens. Dentre elas, pelo fato de a parcela ativa não ser utilizada de forma integral, o sistema exige forças de magnitudes menores, e conseqüentemente, ocorre uma redução do consumo de energia, tornando o custo de implementação do sistema menor quando comparado ao sistema ativo. Também apresenta como vantagem, a continuidade do seu funcionamento diante de casos especiais de falta de energia, onde a parcela passiva do sistema mantém a sua performance, garantindo a segurança e conforto dos usuários.

A Figura 5 ilustra o Edifício Shinsuku Park Tower, localizado em Tóquio, Japão, composto por 52 andares, onde foi utilizado o sistema de amortecedor de massa híbrido (AMH) em formato V. O dispositivo de controle é resultante da combinação entre um amortecedor de massa passivo em formato de pêndulo com um sistema ativo acionado por motor elétrico (YANG, 2001), com objetivo de reduzir a vibração sob ação de sismos moderados e ventos fortes.

Figura 5 - Sistema de controle híbrido: à esquerda o Edifício Shinsuku Park Tower e à direita um dos dispositivos V-shaped AMH instalados



Fonte: Adaptativa de YANG (2001)

3 TUNED LIQUID COLUMN DAMPER (TLCD).

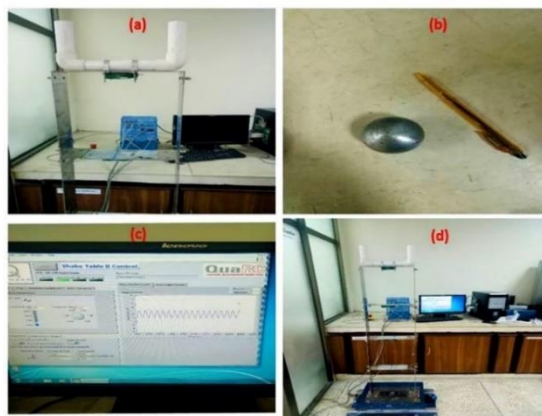
Diante das características supracitadas e analisando a conjuntura da arquitetura moderna, em que são projetados edifícios cada vez mais esbeltos e suscetíveis à ação do vento e a outros fatores contribuintes para o aumento das vibrações, os Absorvedores de Coluna Líquida Sintonizada surgem como uma solução adaptativa às estruturas já existentes perante essa problemática, objetivando garantir o conforto dos usuários.

Em vista disso, para implementação desse sistema, diversas técnicas podem ser aplicadas diante da instalação dos dispositivos de amortecimento, como a variação da geometria dos recipientes e dos líquidos a serem utilizados. Assim, surgem como alternativas, sistemas em configurações esféricas, sistemas de amortecedores de líquidos sintonizados múltiplos, sistemas em formato de “U”, entre outras combinações que podem ser aplicadas nesses mecanismos de controle.

O amortecedor de esfera de coluna de líquido sintonizado “TLCBD” (*Tuned Liquid Column Ball Damper*) é uma forma modificada do amortecedor de coluna de líquido sintonizado convencional (TLCD), sendo também um sistema de controle passivo com a mesma finalidade de controlar as vibrações causadas por ações externas.

Pandey e Mishra (2018) esclarecem que, o sistema diferencia-se do TLCD convencional, pelo fato de ser equipado com um orifício móvel, implementado por meio de esferas de aço, colocadas no centro do tubo de líquido, conforme exhibe figura 6.

Figura 6 – (a) modelo TLCBD; (b) Esfera de aço esférica; (c) janela do software QuaRC; (d) Toda a configuração experimental

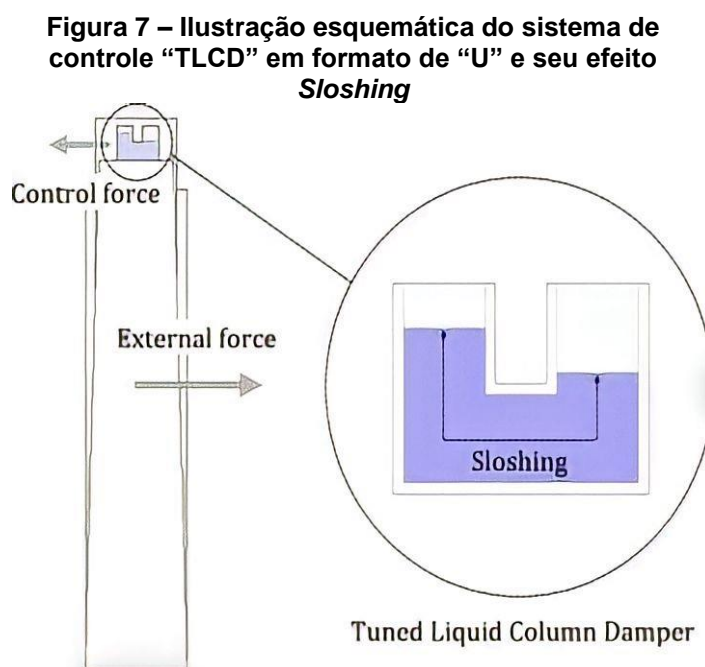


Fonte: Muhammad et al. (2019)

Já os Amortecedores de Coluna de Líquido Sintonizados Múltiplos (MTLCD - Multiple Tuned Liquid Column Dampers, em inglês) são sistemas de amortecimento que constituem-se de diversas colunas de líquido ajustadas sintonizadas em diferentes frequências de ressonância. A principal vantagem dos MTLCD's é a capacidade de amortecer simultaneamente várias frequências de vibração que ocorrem na estrutura, onde cada coluna de líquido é projetada para ser sintonizada em uma frequência específica.

Dessa forma, quando a estrutura é excitada, o sistema absorve a energia vibracional em diversas frequências através das diferentes colunas de líquido. Assim, o MTLCD pode mitigar as excitações das estruturas que apresentam uma ampla variedade de modos de vibrações significativos, como pontes suspensas, torres de transmissão, edificações esbeltas, entre outros.

Por outro lado, o TLCD com formato de "U", que posteriormente será objeto de um estudo aprofundado para verificações e análises, foi introduzido por Sakai et al. (1989). Este sistema foi amplamente aceito pelos pesquisadores devido à sua simplicidade de fabricação e aplicabilidade em ampla faixa de frequências de excitação. Este mecanismo é classificado como um sistema de controle passivo, podendo ser utilizado no alto das edificações, tal como um reservatório, sendo parcialmente preenchido com água, onde absorverá as vibrações provindas da estrutura por meio da agitação do líquido no seu interior, promovendo a dissipação da energia, de forma a preservar a estabilidade da edificação, conforme ilustra figura 7.



Relacionados com os princípios dos amortecedores de massa sintonizados, os TLCD's (*Tuned Liquid Column Damper*) também são conhecidos como amortecedores de "*sloshing*" por alguns autores. Tal efeito é caracterizado pelo movimento oscilatório de um líquido situado em um reservatório quando este é sujeito às forças externas, como movimentos bruscos, aceleração ou desaceleração. Essa manifestação sucede devido à inércia do líquido, que tem a propensão a deslocar-se e redistribuir-se internamente ao recipiente em resposta às forças aplicadas. Dependendo da intensidade do deslocamento do líquido, o "*sloshing*" pode proporcionar resultados primordiais no que tange à estabilidade, segurança e controle do sistema.

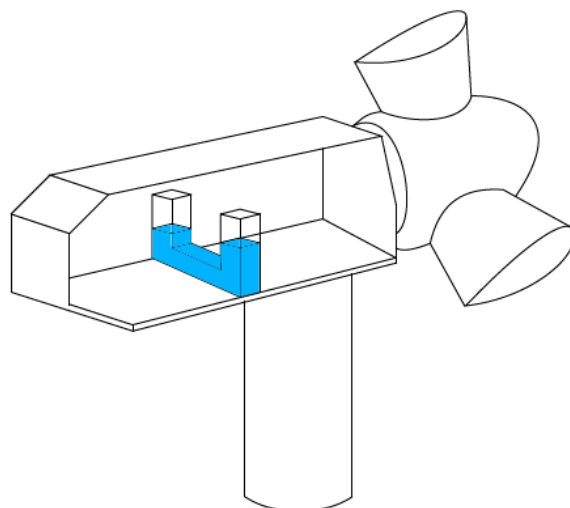
Mendes *et al.* (2019) concluíram que este tipo de dispositivo de controle, resumidamente, absorve uma fração da energia da estrutura e a dissipa através de seu movimento. Nesse sentido, eles são projetados para oscilar na mesma frequência da estrutura, porém com defasagem, de forma a produzir uma força de inércia no sentido contrário ao da vibração estrutural.

Dentre as suas vantagens, é um sistema que possui um ótimo custo-benefício quando comparado com os demais sistemas de controle, uma vez que, por agir passivamente, não necessita de alimentação externa e de tecnologias altamente avançadas, reduzindo o seu custo de execução. Além disso, é considerado um sistema que possui tanto a instalação, quanto sua manutenção relativamente simples.

Partindo dessa premissa, o uso do TLCD vem atraindo diversos pesquisadores ao longo dos anos, visto que é um sistema que possui grande foco nas investigações sobre controle estrutural pelo mundo. Desse modo, surgiram diversos estudos que apresentaram validações experimentais das estruturas controladas por TLCD's sob ações sísmicas (Li; Huo, 2004; Han; Won, 2008; Di Matteo *et al.*, 2014; Zhu *et al.*, 2017; Di Matteo *et al.*, 2018; Espinoza; Carrillo; Suazo, 2018; Furtmüller *et al.* 2019).

Alkmim (2017) aborda, em seus estudos, a análise de um amortecedor de coluna de líquido sintonizado em uma turbina eólica, como mostra figura 8, sujeita a carregamento aleatório. Após realizar uma análise experimental, a caracterização dos parâmetros modais do TLCD e da estrutura foi realizada e os resultados numéricos e teóricos se mostraram em boa concordância. Em seguida, a resposta do sistema acoplado foi investigada. Os resultados mostram que o efeito da massa adicional é o predominante. Embora o efeito do TLCD tenha sido pequeno, ele apresenta uma redução de vibração próximo a sua frequência natural.

Figura 8 – Exemplo de um TLCD em uma turbina eólica

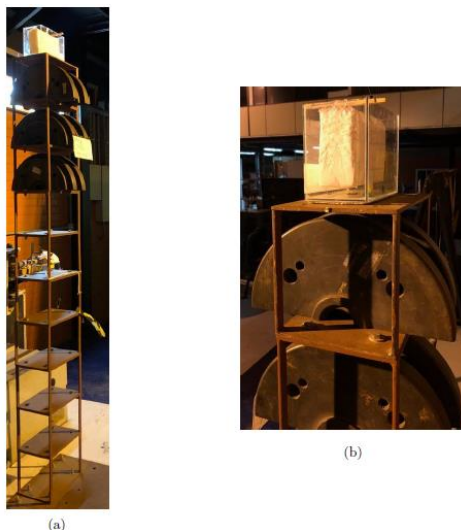


Fonte: Altay *et al.* (2014).

Já Martins (2019) realiza testes com TLCD em formato de “U” acoplado a uma estrutura, objetivando compreender sua performance e eficiência. Tal experimento foi realizado na Universidade de Brasília, utilizando um modelo reduzido de estrutura do tipo pórtico espacial, em módulos, totalizando 10 andares, como observado na figura 9. A análise foi feita inicialmente obtendo a vibração da estrutura solo, e em seguida é acoplado o absorvedor para efeitos de comparação. Os resultados experimentais apresentaram boa concordância, onde foi notado que a estrutura quando acoplada ao absorvedor, apresentou uma queda de 9,51 dB (31,75%) na sua resposta estrutural, para o caso de vibração

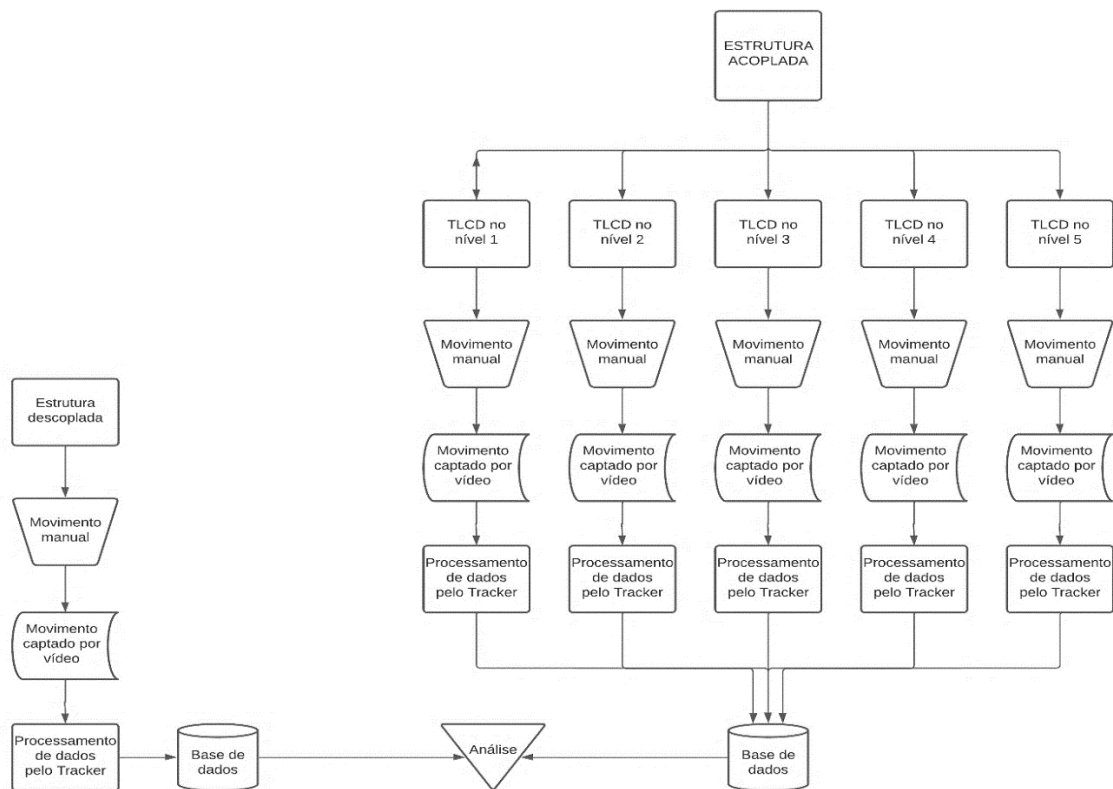
forçada. Além disso, o valor em termos de redução percentual analisando o RMS dos sinais da estrutura com e sem controle para o caso de vibração forçada foi de 31,61%.

Figura 9 – Sistema acoplado: (a) vista geral do sistema e (b) detalhe da posição do ACLS



Fonte: Martins (2019)

Figura 10 – Fluxograma da metodologia



Fonte: Elaboração própria, 2023.

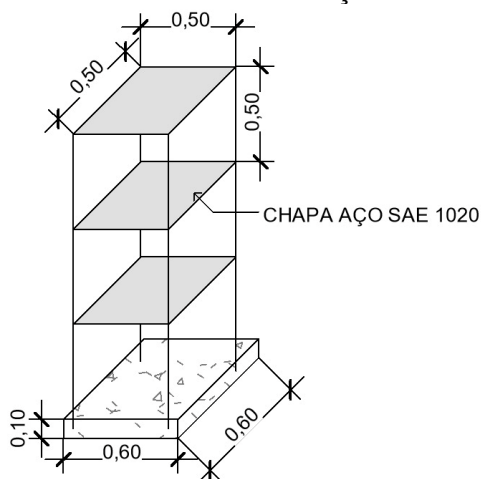
4 METODOLOGIA EXPERIMENTAL

A parte experimental simplificada foi desenvolvida na Universidade Evangélica de Goiás, no centro tecnológico, que consistiu em avaliar a vibração de uma estrutura desacoplada e acoplada, descrevendo seu movimento através de um programa rastreador de imagem. Posteriormente será apresentado a sequência adotada na execução do experimento. A figura 10 ilustra um fluxograma simples da metodologia utilizada.

4.1 MODELO REDUZIDO

A estrutura utilizada será analisada como um modelo de edificação reduzida sem escala real. Sendo composta por três chapas 50x50 cm² de aço SAE 1020 (espessura 1,2 mm), com peso específico do aço igual a 7860 kg/m³ e módulo de elasticidade igual a 205 GPa – cada chapa foi soldada a uma distância 50 cm, em quatro barras de ferros (espessura 8 mm), estando uma barra em cada extremidade, conforme figura 10. Também foi executada uma base de concreto 60x60 cm, com altura de 10cm e f_{ck} 35 MPa.

Figura 11 – Projeto para confecção da estrutura da edificação



Fonte: Elaboração própria, 2023.

Figura 12 – Estrutura da edificação



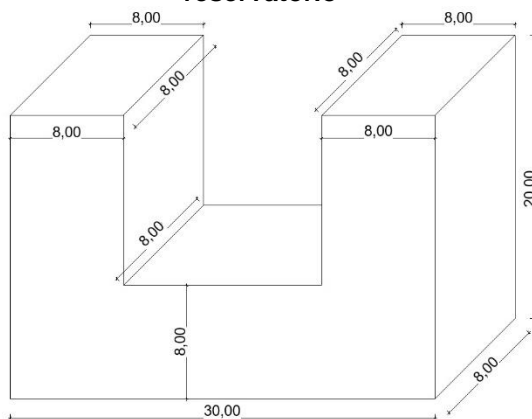
Fonte: Autores, 2023.

A figura 12 retrata as chapas já soldadas nas barras e a ocorrência da concretagem da base sendo realizada, por meio de concreto usinado, para maior enrijecimento do esqueleto, tendo como altura final 1,50 metros.

4.2 RESERVATÓRIO – TLCD

O reservatório correspondente ao TLCD, foi feito de acrílico, com formato de “U” e espessura de 2 mm. Na figura 13, é possível verificar as medidas internas do mesmo, desconsiderando a espessura do acrílico.

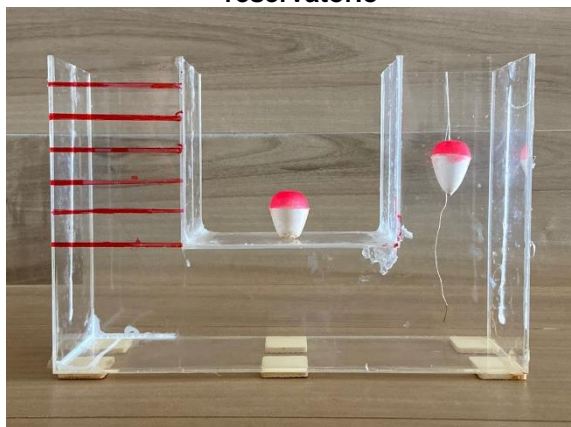
Figura 13 – Projeto para confecção do reservatório



Fonte: Elaboração própria, 2023.

O reservatório foi sinalizado por linhas vermelhas, conforme figura 14 para determinar diferentes níveis de água a serem utilizados durante os testes foram estabelecidas medidas acima da cota de 8 cm, onde o reservatório é apenas um retângulo, assim, as medidas foram feitas a cada 2 cm, para que fosse possível identificar o nível mais eficiente em relação à redução da vibração na estrutura.

Figura 14 – Projeto para confecção do reservatório



Fonte: Autores, 2023.

Sendo assim, foi necessário incluir boias como indicadas na figura 14 à fim de realizar a leitura do movimento da coluna de água. Desse modo, uma boia foi posicionada na parte interna do reservatório, sobrenadando no nível do líquido e reproduzindo seu deslocamento, e a outra foi fixada no centro do reservatório para simular o movimento global da estrutura.

4.3 EXPERIMENTO

O experimento foi realizado em duas etapas: a primeira consiste em avaliar a estrutura desacoplada do absorvedor com o intuito de analisar o deslocamento e a frequência da estrutura. Na segunda parte, acoplou-se o absorvedor na estrutura, variando o nível da coluna de água com o intuito de encontrar o nível de água mais eficiente.

Inicialmente, é colocado uma boia no centro da chapa da estrutura, conforme figura 15, com o intuito de destacar um ponto da estrutura para rastreamento. A estrutura é impulsionada manualmente e sem nenhuma carga sobre si, para captação de sua vibração livre através de vídeos que, posteriormente, serão inseridos em um programa para rastreamento e determinação do deslocamento.

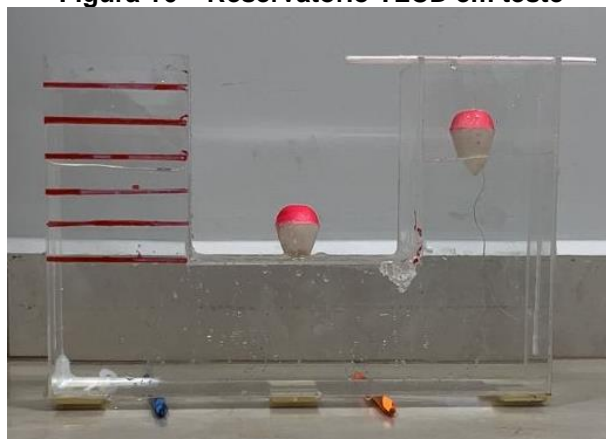
Figura 15 – Projeto para confecção do reservatório



Fonte: Autores, 2023.

Na segunda etapa, o reservatório foi gravado separadamente, apoiado em duas canetas (conforme é possível ver na figura 16) para que houvesse um deslizamento. Com a mesma força manual, ele é impulsionado, realizando esta ação com os cinco níveis de água diferentes, que compreendem – nível 1: 1850 ml, nível 2: 2100 ml, nível 3: 2350 ml, nível 4: 2600 ml e nível 5: 2850 ml, o que gerou cinco vídeos díspares.

Figura 16 – Reservatório TLCD em teste



Fonte: Elaboração própria, 2023.

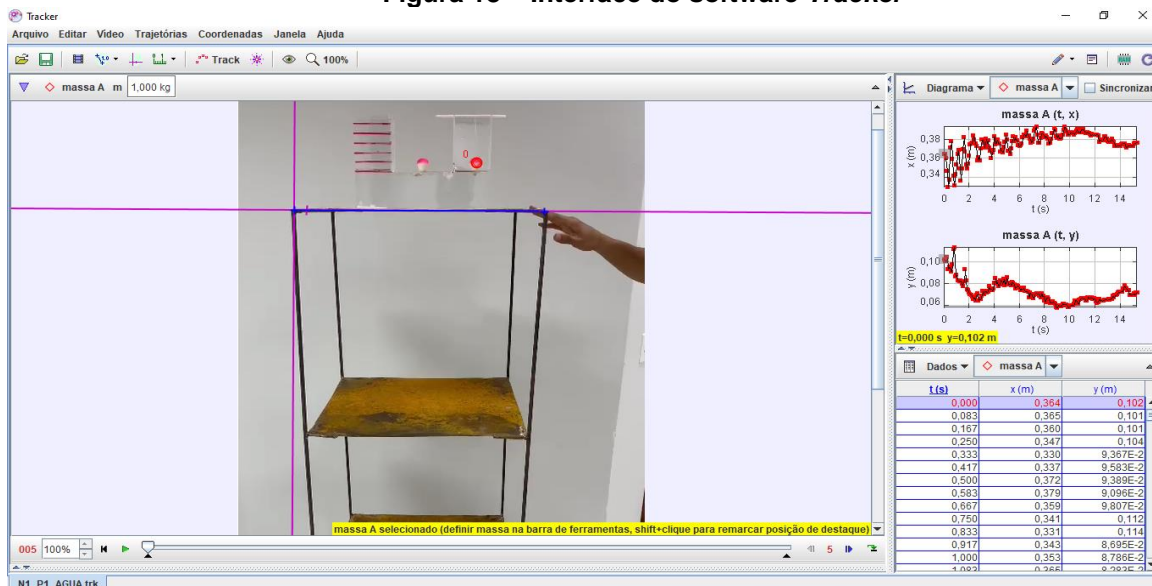
Em seguida, para o próximo teste, o reservatório TLCD foi colocado na estrutura, como indicado na figura 17. Para fins de evitar o deslizamento durante a oscilação, foi colocado sob ele um material adesivo para gerar aderência. Novamente, com força manual sobre a estrutura, a gravação ocorreu com o reservatório cheio nos cinco níveis de água, e em cada uma das três chapas, com as diferentes alturas, resultando em um amplo levantamento de dados.

Figura 17 – Projeto para confecção do reservatório



Fonte: Autores, 2023.

Figura 18 – Interface do software Tracker



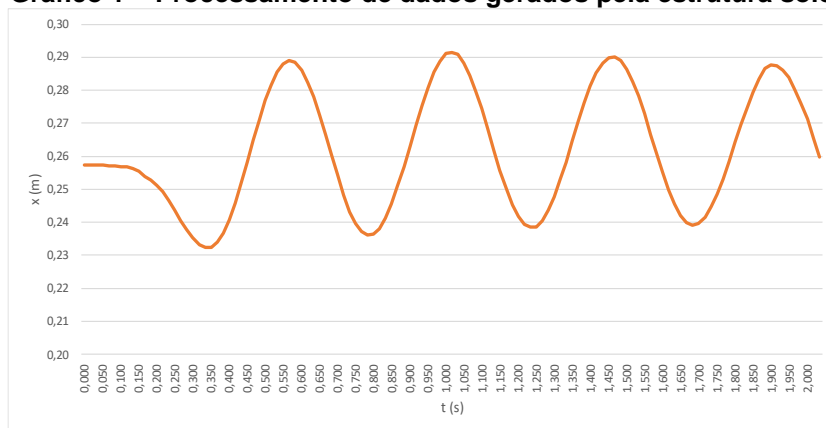
Fonte: Elaboração própria, 2023.

Após a coleta dos dados, deu-se início à leitura destes, a partir do *software* gratuito, *Tracker Video Analysis and Modeling Tool*, disponível para plataformas híbridas (Windows, Linux e Mac OS X). Este pode ser usado para coleta de dados referentes a sistemas físicos múltiplos através de vídeo análise, onde seus utilizadores fazem o *download* do mesmo no computador e a abertura da filmagem do fenômeno físico, e o *software* se incumbem de coletar os dados e gerar gráficos respectivos ao vídeo.

Na figura 18, a interface do *software* apresenta, em lilás, o eixo de coordenadas x e y , usado para definir o ponto zero de deslocamento em metros. A linha azul é a escala que usa uma medida real de um objeto do vídeo e serve como referência para calcular o deslocamento. No canto direito, o *software* apresenta os dados gerados em forma de gráfico e valores numéricos brutos.

O vídeo da estrutura solo, com a boia no centro da chapa usada como referência, foi inserido no *software* que gerou os deslocamentos da estrutura em função do tempo necessário para descrever o comportamento da estrutura e posteriormente determinar a equação de deslocamento do sistema e determinação da frequência amortecida do sistema.

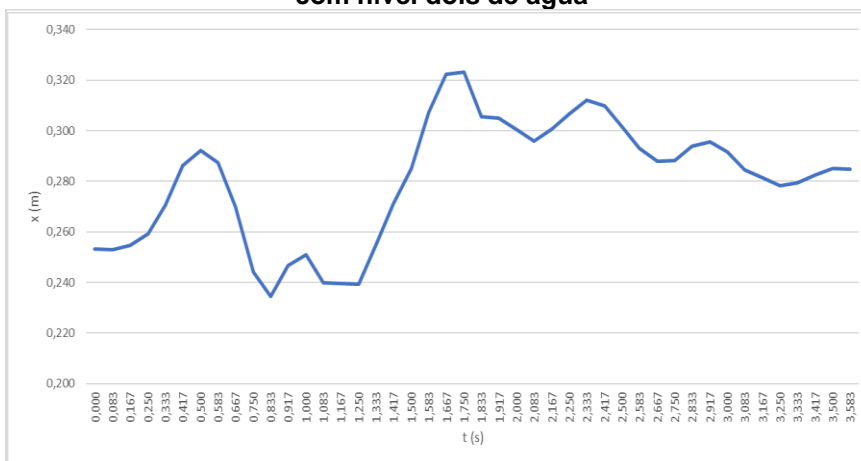
Gráfico 1 – Processamento de dados gerados pela estrutura solo



Fonte: Elaboração própria a partir de dados do software Tracker, 2023.

No evento seguinte, foram inseridos os vídeos do TLCD solo, com os cinco níveis de água diferentes, para processamento dos dados, onde a referência usada é a boia que flutua sobre a água, localizada no lado direito e amarrada por uma linha a um canudo que está apoiado no reservatório, o resultado equivalente está demonstrado no gráfico 2.

Gráfico 2 – Processamento de dados gerados pelo reservatório solo com nível dois de água



Fonte: Elaboração própria a partir de dados do software Tracker, 2023.

Para finalizar o experimento, realizou-se a leitura dos vídeos da estrutura acoplada ao TLCD, pelo *software Tracker*, onde, como citado anteriormente, foram realizados todos os cinco níveis de água, com cada nível testado nas três chapas de alturas diferentes. Para essa coleta dos dados, a boia colada no centro do reservatório foi usada como referência, pois esta indicava o deslocamento global da estrutural com o sistema acoplado. Geradas as informações necessárias para uma análise detalhada, foi feito o levantamento dos dados, e a partir destes, elaborados os gráficos para o primeiro estudo.

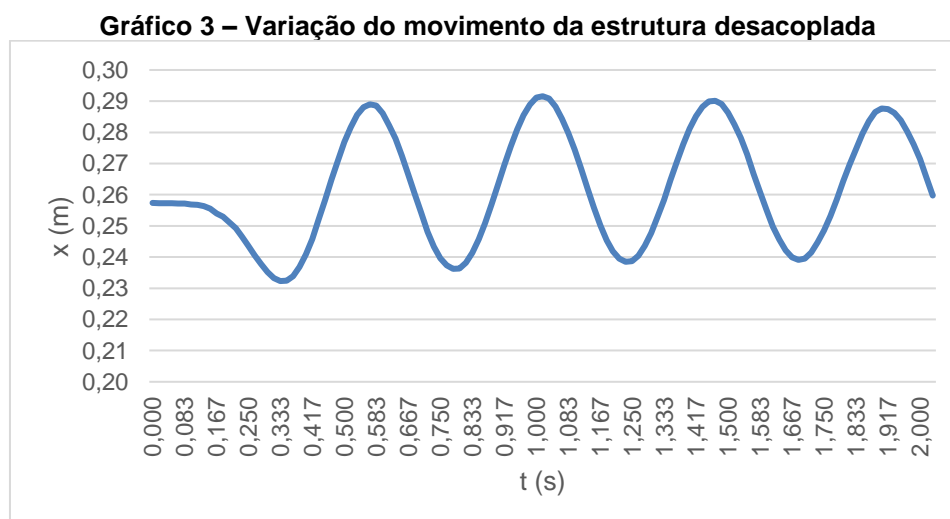
Nesse estudo, foi verificada a baixa eficácia entregue nos pavimentos mais baixos da estrutura e, devido a este fator, a análise foi aprofundada apenas nos gráficos gerados no pavimento superior. Para esses gráficos foram desenvolvidas as equações, por meio do software de avaliação gratuita de 21 dias, *Origin Graphing and Analysis*, para o estudo comparativo matemático da eficácia.

5 RESULTADOS

Conforme metodologia apresentada realizou-se uma análise experimental simples com o intuito de avaliar a eficácia do uso do TLCD. Para análise do sistema, é necessário o estudo da estrutura desacoplada para em seguida avaliar o sistema acoplado e analisar o impacto do TLCD na estrutura.

5.1 ESTRUTURA DESACOPLADA

Com o intuito de avaliar a frequência e o deslocamento da estrutura desacoplada utilizou-se os dados gerados pelo programa rastreador *Tracker*. O gráfico 3 apresenta os quatro ciclos iniciais da estrutura referente a uma análise de 2 s.



Fonte: Elaboração própria, 2023.

Adotaram-se quatro ciclos para fins didáticos. Porém, ao analisar os dados como um todo, nota-se a presença de um amortecimento natural da estrutura com perda de energia de vibração ao longo do movimento. A estrutura desacoplada encerra o movimento após 15 s.

Para a equação do movimento da estrutura desacoplada e acoplada usou-se como referência a equação geral da onda dada por:

$$y = A \cdot e^{-\omega_n \cdot \xi \cdot x} \cdot \sin(\omega_d \cdot x + \phi) + B \quad (1)$$

Onde:

y : deslocamento da estrutura

x : tempo de oscilação

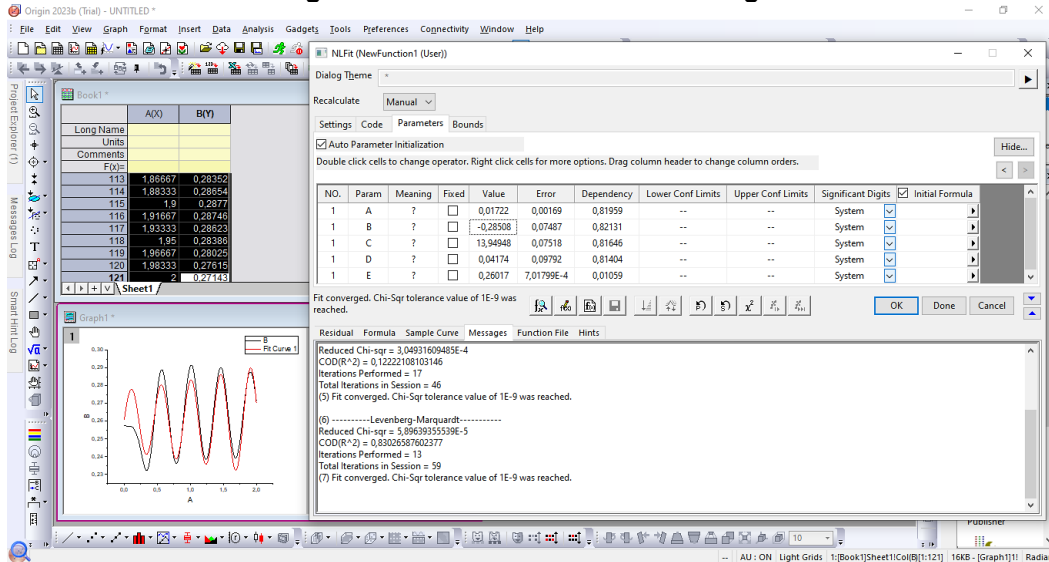
ω_n : a frequência natural da estrutura

ω_d : a frequência amortecida

ξ : o amortecimento do sistema

ϕ : ângulo de fase

Figura 19 – Interface do software Origin



Fonte: Elaboração própria, 2023.

Através do software *Origin Graphing and Analysis* realizou-se o ajuste de curvas para representação do experimento. Para a estrutura desacoplada a equação é dada:

$$y = 0,01721 \cdot e^{-0,28546x} \cdot \sin(13,95x - 3,0999) + 0,26 \quad (2)$$

Ao analisar a equação 2, observou-se que a frequência da estrutura é de aproximadamente 13,95 rad/s (2,22 Hz). A partir da análise da estrutura solo, temos o que seria a movimentação de uma estrutura comum, sem o uso de nenhum sistema de controle. Por ser um sistema reduzido, de materiais, dimensões e sob ações externas diferentes das usuais, a movimentação aqui resultante não se traduz na movimentação de uma estrutura real de mesma proporção, mas oferece um ponto fundamental de partida para as análises.

5.2 ESTRUTURA ACOPLADA

Após a análise da estrutura desacoplada o próximo passo é analisar a estrutura acoplada ao TLCD variando os níveis de água. Os gráficos 4, 5 e 6 apresentam os três níveis relevantes para o estudo, sendo que os demais níveis adotados apresentaram uma pequena diferença no valor dos deslocamentos e frequências em estudo.

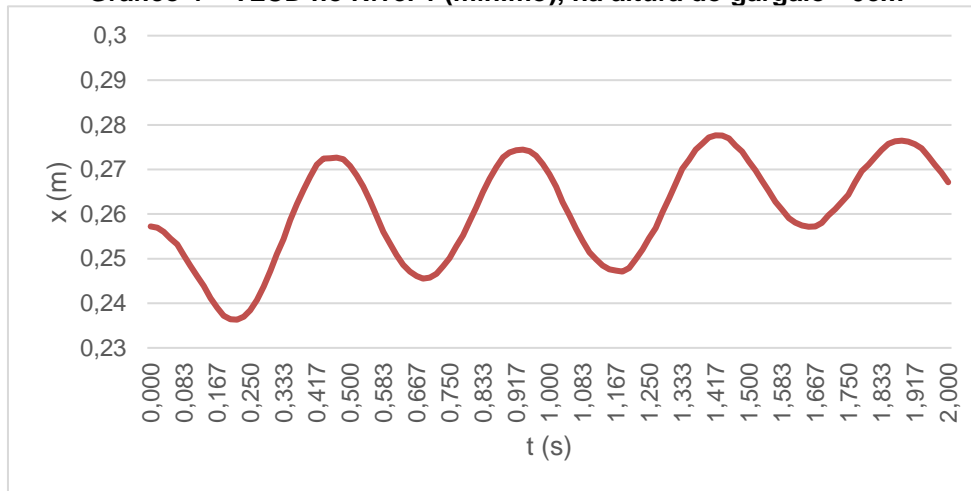
Para o gráfico 4 a curva ajustada apresentou a seguinte equação:

$$y = -0,01743 \cdot e^{0,22237x} \cdot \sin(12,85x - 0,90) + 0,26063 \quad (3)$$

No gráfico 4 observou-se a frequência aproximada de 12,85 rad/s (2,05 Hz). O tempo de encerramento do movimento da estrutura foi de 12,6 s. Observa-se que a inserção

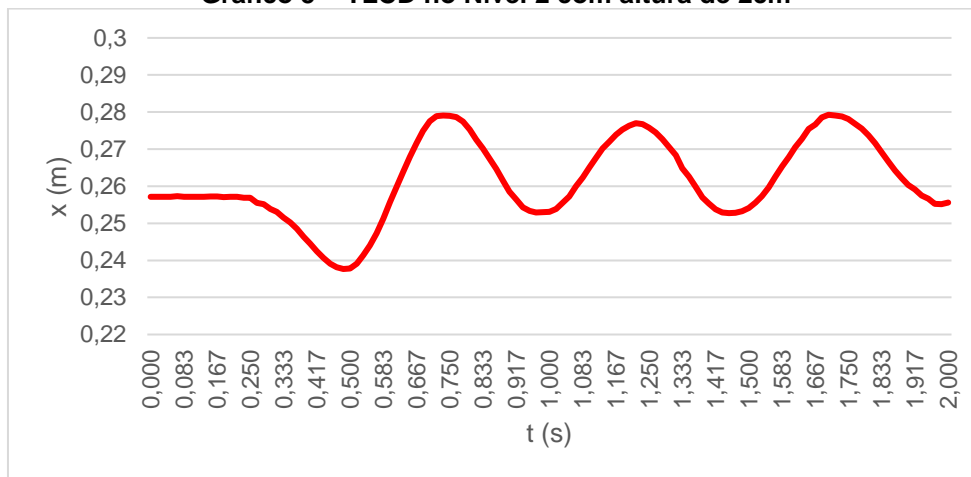
do TLCD no primeiro nível já resultou em uma queda na frequência e no movimento total da estrutura.

Gráfico 4 – TLCD no Nível 1 (mínimo), na altura do gargalo - 0cm



Fonte: Elaboração própria, 2023.

Gráfico 5 – TLCD no Nível 2 com altura de 2cm



Fonte: Elaboração própria, 2023.

Para o gráfico 5 a curva ajustada apresentou a seguinte equação:

$$y = 0,00963 \cdot e^{-0,17634x} \cdot \sin(12,44x - 1,137) + 0,26144 \quad (4)$$

No quinto gráfico observou uma nova queda na frequência e no tempo de movimento respectivamente 12,44 rad/s (1,98 Hz) e 11,7s.

Para o gráfico 6 a curva ajustada apresentou a seguinte equação:

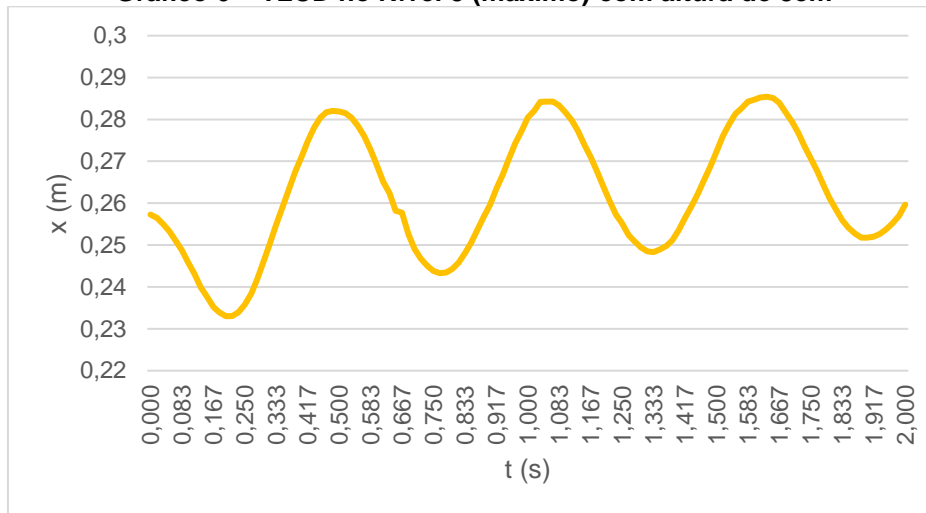
$$y = 0,02688 \cdot e^{0,32104x} \cdot \sin(-10,9x + 6,77992) + 0,26336 \quad (5)$$

Por fim a curva ajustada para o gráfico 6 apresentou uma frequência de aproximadamente 10,90 rad/s (1,73 Hz). O tempo para finalização do movimento foi de 10,2 s. Os gráficos 7 a 9 apresentam um comparativo entre os movimentos da estrutura desacoplada e da estrutura acoplada para cada nível apresentado.

Nos gráficos é possível observar uma redução na amplitude dos movimentos que comparados com a redução no tempo de finalização do movimento demonstra que o TLCD é capaz de reduzir consideravelmente o movimento da estrutura em casos de vibrações

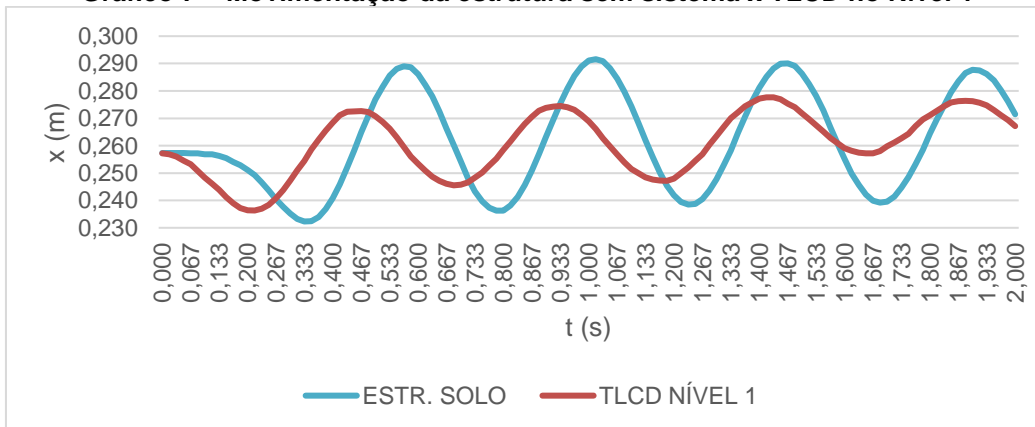
excessivas tais como vento e terremotos. A tabela a seguir apresenta um resumo das frequências obtidas no experimento.

Gráfico 6 – TLCD no Nível 5 (máximo) com altura de 8cm



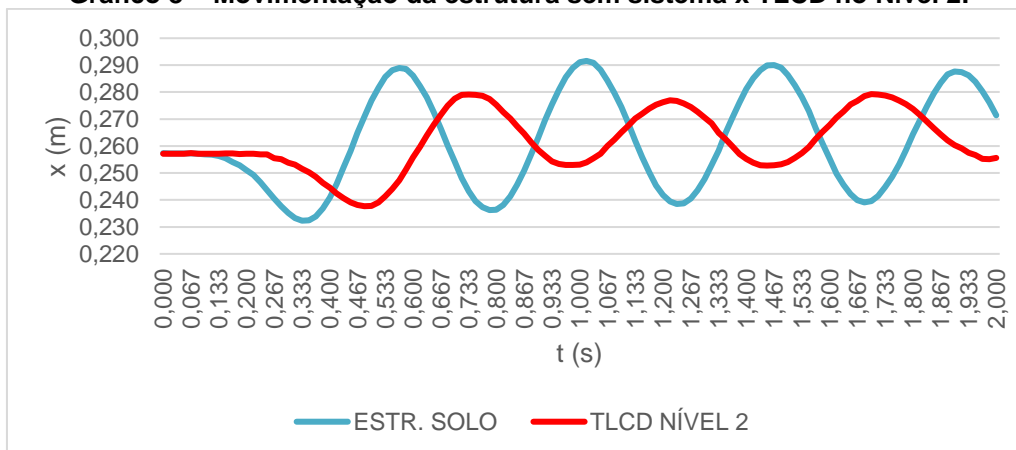
Fonte: Elaboração própria, 2023.

Gráfico 7 – Movimentação da estrutura sem sistema x TLCD no Nível 1



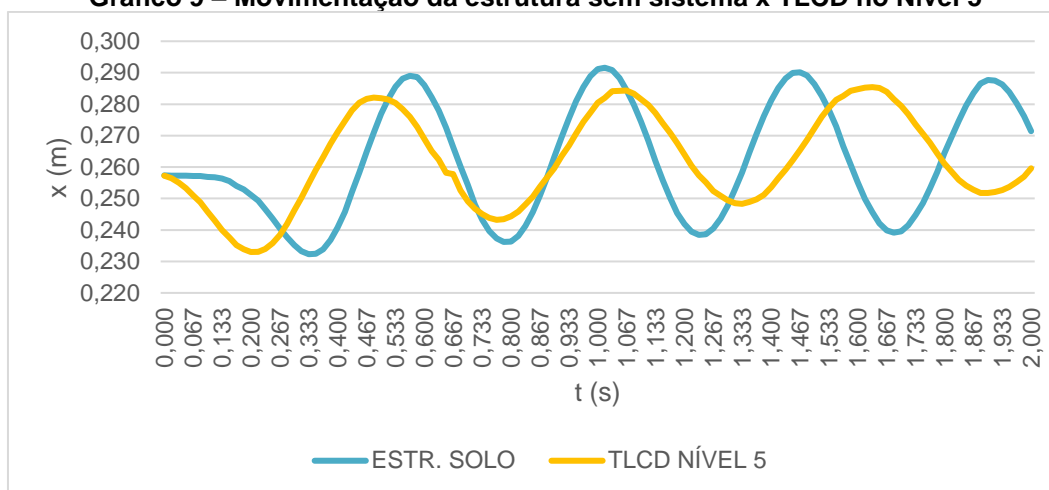
Fonte: Elaboração própria, 2023.

Gráfico 8 – Movimentação da estrutura sem sistema x TLCD no Nível 2.



Fonte: Elaboração própria, 2023.

Gráfico 9 – Movimentação da estrutura sem sistema x TLCD no Nível 5



Fonte: Elaboração própria, 2023.

Tabela 1 – Redução da frequência por nível analisado

Nível	Frequência (Hz)	Redução (%)
Desacoplado	2,22	-
Acoplado nível 1	2,05	7,66
Acoplado nível 2	1,98	10,81
Acoplado nível 5	1,73	22,07

Fonte: Autoria própria, 2023.

A redução da frequência da estrutura acoplada comprova a viabilidade do uso do absorvedor passivo para mitigação de vibração em estruturas. Observa-se que o nível 5 apresentou uma maior redução na frequência do sistema demonstrando que esse nível é mais eficaz no amortecimento do sistema estudado. Colaborando com resultados favoráveis a esse sistema, segundo (SHAH; USMAN, 2022) há uma redução de até 94,06% na vibração da estrutura para o TLCD posicionado no pavimento superior, em um experimento com cargas e vibrações bem controladas. Tal fato deve-se ao aumento na massa adicional ao sistema alterando a rigidez equivalente e permitindo uma redução no deslocamento. Outro fato a destacar é o movimento *sloshing* do sistema que interferiu na absorção da energia.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O sistema de mitigação de vibração é estudado a várias décadas principalmente nas áreas mecânica, aeronáutica e de energia. Porém com as mudanças climáticas regiões que antes não sofriam com altas cargas de ventos, vibrações devido a terremotos vêm sofrendo com tais problemas. Devido o despreparo para combater esses problemas surgiu a necessidade de estudar meio para mitigar tais vibrações. Ao longo de vários anos de estudo diversos pesquisadores vêm apresentando soluções. Uma das soluções considerada de baixo custo e fácil implantação é o uso de absorvedores passivos de vibração. São estruturas que funcionam como reservatórios dividido em colunas que devido o deslocamento da água no seu interior e o acréscimo de massa ao sistema reduzem a frequência e a amplitude do movimento.

Devido à falta de estudo sobre dinâmica estrutural nas universidades, surgiu a necessidade de realizar estudos simplificados para apresentar os problemas de vibrações

em estruturas e as formas de mitigar tais vibrações. O presente trabalho buscou de forma simplificada demonstrar um caso simples de mitigação de vibração em um sistema estrutural reduzido.

Para apresentar e comprovar a eficácia desse estudo adotou-se um experimento simples com um sistema estrutural reduzido para demonstrar e observar o funcionamento de um absorvedor líquido de coluna sintonizado (TLCD).

Tal experimento consistiu em avaliar o movimento da estrutura desacoplada e acoplada a um TLCD variando os níveis de água em seu interior. Observou-se no estudo que o uso do TLCD é capaz de reduzir a amplitude da vibração e o tempo que ela é submetida ao movimento. Para o nível com maior quantidade de água comprovou a eficiência do aumento da massa adicional contribuindo para uma redução de 22,07% na frequência do sistema e de 32 % no tempo gasto para cessar o movimento comprovando a eficácia do sistema.

O presente estudo teve como objetivo, através de um simples experimento, atizar a curiosidade dos novos engenheiros no que diz respeito à dinâmica de vibrações e alertar sobre efeitos da vibração em sistemas estruturais e apresentar formas de mitigar tal problema.

REFERÊNCIAS

ALKMIM, Mansour Hassan. Análise de um amortecedor de coluna de líquido sintonizado em uma turbina eólica sujeita a carregamento aleatório. 2017. xvi, 90 f., il. **Dissertação (Mestrado em Ciências Mecânicas)** — Universidade de Brasília, Brasília, 2017.

Disponível em: <<https://repositorio.unb.br/handle/10482/31142>>. Acesso em: 29 maio 2023.

ALTAY, O. et al. Figura 8 – Exemplo de um TLCD em uma turbina eólica. 2014. In: **Proceedings of the IX international conference on structural dynamics, Porto, Portugal**. [S.l.: s.n.], v. 12.

DI MATTEO, A. et al. Experimental validation of a direct pre-design formula for TLCD. **Engineering Structures, Elsevier Ltd, v. 75, p. 528–538, 2014**. Disponível

em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.engstruct.2014.05.045>>. Acesso em: 29 maio 2023.

ESPINOZA, G.; Carrillo, C.; Suazo, A. Analysis of a tuned liquid column damper in

FURTMÜLLER, T. et al. Base-isolated structure equipped with tuned liquid column damper: An experimental study. **Mechanical Systems and Signal Processing. 2019. v. 116, p. 816–831**.

HAN, B. K.; Won, Y. J. Stochastic seismic performance of TLCD for the passive control of structures. **KSCE Journal of Civil Engineering, v. 2, n. 3, p. 273–280, 2008**.

IGLESIA, Socrate Muñoz. Figura 1 - Uso de amortecedor de massa sintonizado no edifício Taipei 101. 2018. 486 x 217 pixels. Disponível em:

<<https://comunidade.altoqi.com.br/solucoes-estruturais/>>. Acesso em: 29 maio 2023.

IGLESIA, Socrate Muñoz. Figura 2 - Uso de amortecedor de líquido sintonizado no projeto Millenium Tower. 2018. 331 x 227 pixels. Disponível em:

<https://comunidade.altoqi.com.br/solucoes-estruturais/>. Acesso em: 29 maio 2023.

IGLESIA, Socrate Muñoz. Soluções estruturais: 10 formas de controlar os deslocamentos e acelerações horizontais. 2018. Disponível em: <<https://comunidade.altoqi.com.br/solucoes-estruturais/>>. Acesso em: 29 maio 2023.

LI, HONG-NAN; HUO, Lin-Sheng. Seismic control of eccentric structures using TLCD

MARTINS, Juliano Ferreira. Estudo analítico-experimental de parâmetros ótimos para o controle passivo via absorvedor de vibrações do tipo coluna líquida sintonizada em estruturas. 2019. 90 f. **Dissertação (Mestrado)** - Curso de Engenharia, Universidade de Brasília, Brasília, 2019. Disponível em: <<https://repositorio.unb.br/handle/10482/37071>>. Acesso em: 01 junho 2023.

MARTINS, Juliano Ferreira. Figura 9 - Sistema acoplado: (a) vista geral do sistema e (b) detalhe da posição do ACLS. 2019. 256 x 265 pixels. Disponível em: <<https://repositorio.unb.br/handle/10482/37071>>. Acesso em: 01 junho 2023

MENDES, Maurício Vitali; RIBEIRO, Paulo Marcelo Vieira; PEDROSO, Lineu José. Efeitos da interação solo-estrutura na análise sísmica de edificações com múltiplos amortecedores de coluna líquida pressurizada sintonizada. **Revista Latino-Americana de Sólidos e Estruturas**, Rio de Janeiro, v. 8, n. 16, p. 1-21, ago. 2019. Disponível em: <<https://www.scielo.br/j/lajss/a/H7ddC9bGCNc9BLDyP7qDsGL/?lang=en#>>. Acesso em: 29 maio 2023.

MUHAMMAD, Tanveer; MUHAMMAD, Usman; KHAN, Imdah Ullad; AHMAD, Shakil; HANIF, Asad; FAROOQ, Syed Hassan. Figura 6 – (a) modelo TLCBD; (b) Esfera de aço esférica; (c) janela do software QuaRC; (d) Toda a configuração experimental. 2019. 297 x 227 pixels. Disponível em: <<https://journals.plos.org/plosone/article?id=10.1371/journal.pone.0224436>>. Acesso em: 01 junho 2023.

non-linear structures subjected to seismic excitations. **Latin American Journal of Solids and Structures**. 2018. v. 15, n. 7. Disponível em: <<http://www.scielo.br/>

PANDEY, Dharendra Kumar; MISHRA, Sudib Kumar. Moving Orifice Circular Liquid Column Damper for Controlling Torsionally Coupled Vibration. **Revista de Fluidos e Estruturas**, India, v. 82, p. 357-374, 1 2018. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0889974617306904>>. Acesso em: 30 maio 2023.

PARK, ByungJin; LEE, YongJae; PARK, MinJae; JU, Young K. . Figura 7 - Ilustração esquemática do sistema de controle “TLCD” em formato de “U” e seu efeito Sloshing. 2018. 350 x 284 pixels. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0141029617339068>>. Acesso em: 01 junho 2023.

SAKAI, F., TAKEDA, S., TAMAKI, T. . Dispositivo de novo tipo de amortecedor de coluna de líquido sintonizado para supressão de vibração de edifícios. 1989. In: **Anais da Conferência Internacional sobre Edifícios Altos, Nanjing**, Chin. pp. 926–931.

[scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1679-78252018000700504&lng=e](https://www.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1679-78252018000700504&lng=e)>. Acesso em: 29 maio 2023.

semi-active **neural networks**. 2004. p. 336–340.

SHAH, M. U.; USMAN, M. An experimental study of tuned liquid column damper controlled multi-degree of freedom structure subject to harmonic and seismic excitations. 2022. In: **Plos One**.

YANG, Guangqiang. Large-scale magnetorheological fluid damper for vibration mitigation: modeling, testing and control. **Thesis (PhD in Civil Engineering)** - University of Notre Dame, Notra Dame, Indiana, 2001.

YANG, Guangqiang. Figura 3 - Sistema de controle ativo: à esquerda o Edifício Kyobashi-Seiwa e à direita uma ilustração do sistema de controle. 2018. 291 x 227 pixels. Disponível em: <http://sstl.cee.illinois.edu/papers/gyang2_thesis.pdf>. Acesso em: 29 maio 2023.

YANG, Guangqiang. Figura 4 - Uso de amortecedor de líquido sintonizado no projeto Millenium Tower. 2018. 492 x 227 pixels. Disponível em: <http://sstl.cee.illinois.edu/papers/gyang2_thesis.pdf>. Acesso em: 29 maio 2023.

YANG, Guangqiang. Figura 5 - Sistema de controle híbrido: à esquerda o Edifício Shinsuku Park Tower e à direita um dos dispositivos *V-shaped* AMH instalados. 2018. 332 x 204 pixels. Disponível em: <http://sstl.cee.illinois.edu/papers/gyang2_thesis.pdf>. Acesso em: 29 maio 2023.