

ANÁLISE DE UM ABSORVEDOR PASSIVO DE COLUNA DE LÍQUIDO SINTONIZADO APLICADO NO CONTROLE DE VIBRAÇÃO DE PÓRTICO

Marcos Eduardo Cândido Santos

*Discente, Bacharelado em Engenharia Civil, UniEVANGÉLICA - Centro Universitário de Anápolis
(marcos_eduardocs@hotmail.com)*

Wandesson Neves Santos

*Discente, Bacharelado em Engenharia Civil, UniEVANGÉLICA - Centro Universitário de Anápolis
(wandesson_santos@hotmail.com)*

Agnaldo Antonio Moreira Teodoro Silva

*Professor Mestre, Bacharelado em Engenharia Civil, UniEVANGÉLICA - Centro Universitário de Anápolis
(agnaldo.silva@docenteunievangelica.edu.br)*

Leandro Daniel Porfiro

*Professor Doutor, Bacharelado em Engenharia Civil, UniEVANGÉLICA - Centro Universitário de Anápolis
(fisicoleandrodaniel@gmail.com)*

RESUMO

Um problema recorrente na engenharia civil são os efeitos causados pelas vibrações nas estruturas. Existem vários exemplos das causas desses intempérie, entre estes estão: as vibrações ocasionadas pela força do vento, instabilidade estrutural, terremotos entre outros. A resultante desses efeitos nas estruturas pode gerar catástrofes que põem em risco a vida de todos que estejam próximos. Nesse sentido sabe-se que o controle de vibrações é uma área bastante relevante para a Engenharia, e uma alternativa para esse tipo de problema supracitado é a utilização de absorvedores de vibrações, cujo principal objetivo está na atenuação e controle das oscilações de um sistema. Para esse fim, o presente trabalho apresenta um estudo de caso com a construção de uma maquete e o desenvolvimento de um código computacional que foi utilizado para medir as frequências de vibrações produzidas pela maquete através de um sensor em um Arduino. Foi utilizando também um absorvedor de vibração baseado em absorvedores de coluna de líquido sintonizado (ACLS) – do inglês, Tuned liquid column dampers (TLCD) produzido em acrílico e acoplado ao pórtico. Os resultados dos ensaios foram comparados com uma simulação numérica computacional baseada em método dos elementos finitos (MEF) para tal foi utilizado o software computacional ANSYS V19.0 student license.

PALAVRAS-CHAVE: Absorvedor de vibrações. Método dos elementos finitos. Absorvedores de coluna de líquido sintonizada. ANSYS

1-INTRODUÇÃO

Com o crescimento demográfico e o conseqüente aumento da densidade populacional, se fez necessária a elaboração de métodos construtivos mais eficientes, o que culminou em estruturas com perfis mais elevados. Contudo, toda evolução traz consigo novos desafios e problemas. A baixa resistência às vibrações ocasionadas pelo vento e por terremotos são cada vez mais constantes nesses tipos de estruturas. Isso ocorre devido as estruturas atuais terem uma grande amplitude e uma alta flexibilidade causando assim instabilidade quando colocadas em determinadas situações. A título de exemplo desses fenômenos pode ser citado o edifício Millenium Palace situado em Balneário Camboríu, no estado de Santa Catarina, que devido a fortes ventos ocasionados por uma tempestade na região demonstrou vulnerabilidade a vibrações em sua estrutura que foram registradas pelos moradores, sendo perceptível o movimento da edificação através das notáveis ondulações geradas na piscina da edificação.

Nesse sentido sabe-se que o controle de vibrações é uma área bastante relevante para engenharia, pois a partir do seu controle é possível gerar por exemplo, um conforto em edifícios que contemplam uma grande esbeltez, visto que os apartamentos da cobertura tendem a demonstrar uma maior oscilação gerando desconforto para seus residentes, causando assim uma desvalorização no imóvel. Uma alternativa para esse tipo de problema é a utilização de absorvedores de vibrações, cujo principal objetivo está na atenuação e controle das vibrações de um sistema. Existem técnicas e métodos variados que permitem o controle das vibrações e, dentre estes existem aquelas que utilizam os absorvedores que tentam equilibrar a estrutura através de um fluido. Esses absorvedores são chamados de absorvedores de coluna de líquido sintonizado (ACLS) – do inglês, Tuned Liquid Column Dampers (TLCD). Alkmim (2017) explica que a utilização de TLCD como mecanismo de absorção de vibração é bastante interessante pelo fato de o mecanismo possuir naturalmente frequências baixas sendo de baixa complexidade a sintonização com a estrutura.

Porém esses fenômenos são descritos por uma física complexa o que dificulta a sua resolução manual, sendo necessário a utilização de métodos computacionais modernos para simulá-las. Uma técnica bastante difundida é o método dos elementos finitos (MEF), metodologia essa que compõem grande parte dos softwares de engenharia moderna atualmente. Mirlisenna (2019) explica que, o método pode ser aplicado na resolução e diagnóstico de problemas de análise estrutural por meio da obtenção de deslocamentos, deformações e tensões, também permite representar diversos cenários e avaliar o desempenho de produtos com a aplicação de critérios de resistência, rigidez ou fadiga.

2-VIBRAÇÕES

Há inúmeros tipos de vibrações, dentre elas temos; as vibrações livres, vibrações forçadas, vibrações não amortecidas, vibrações amortecidas, vibrações lineares, vibrações não lineares, vibrações determinística, vibrações aleatórias. Rao (2009) define tais vibrações como:

Vibrações Livres são aquelas onde depois de aplicada a oscilação na estrutura, a mesma continua a vibrar, mesmo sem aplicação de forças externas. Não havendo nenhum tipo de força externa atuando no sistema como por exemplo a oscilação de um pêndulo.

Vibrações forçadas são aquelas onde é aplicado ao sistema, forças externas, muitas vezes contínuas, essas vibrações podem ser encontradas em maquinários por exemplo. Uma outra situação que pode ocorrer com aplicações de forças externa é a

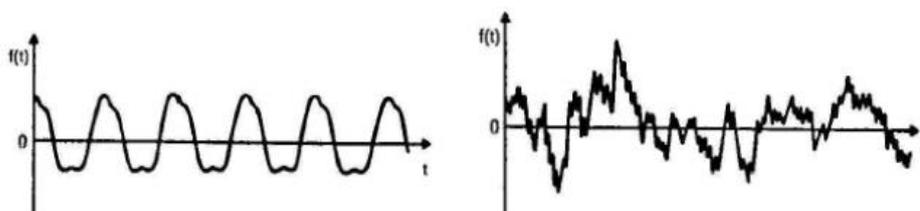
ressonância, onde a estrutura entra em harmonia com as frequências naturais do sistema causando oscilações perigosas ao sistema.

Vibrações não amortecidas são caracterizadas por não perder energia durante a vibração, não havendo dissipação da mesma, por outro lado, vibrações amortecidas são caracterizadas quando há perda de energia.

Vibrações lineares apresentam sistema sem alterações de comportamento, a sua vibração acontece de forma linear, entretanto, vibrações que variam são denominados Vibrações não lineares.

Clough e Penzien (2003) classificam a força determinística em função da variável tempo, quando não há o conhecimento exato dessa variação em função do tempo, pode se classificar o fenômeno como carregamento dinâmico aleatório conforme a Figura 01.

Figura 1 - Excitação determinística (periódica) e Excitação Aleatória



Fonte: Rao, 2009.

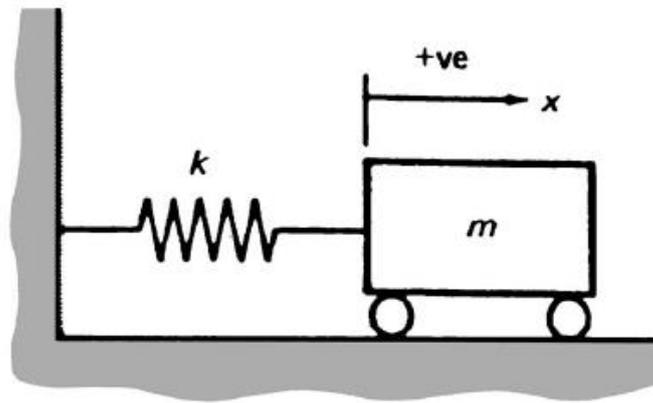
Rao (2009) explica que as análises de um sistema vibratório baseia-se nas aplicações das forças externas caracterizadas como entrada, e repostas, denominadas tempo. De maneira geral, a análise na prática está diretamente ligada as condições colocadas inicialmente no sistema, entretanto, há uma complexidade muito vasta na grande parte dos sistemas encontrados na prática, o que dificulta a caracterização do sistema. Devido a essa complexidade, apenas os dados mais importantes são levados em consideração para a análise da estrutura, sendo assim, comumente a necessidade da modelagem matemática, para obtenção dos resultados e análises dos mesmos.

2.1-VIBRAÇÃO COM UM GRAU DE LIBERDADE

Genta (2009) define sistemas com um grau de liberdade, como, os sistemas mais simples no âmbito do estudo da dinâmica estrutural. De modo que tais sistemas mesmo com sua simplicidade exerce uma enorme relevância para demonstração do comportamento dos sistemas mais complexos.

Arnold (1995) explica um sistema com um grau de liberdade usando um corpo de massa m , livre para se deslocar ao longo de uma superfície horizontal, tendo em sua extremidade uma mola de rigidez k . Seu deslocamento ocorre para a direita fazendo com que a mola tenha uma força de reação para a esquerda. Após a liberação do corpo, tem-se uma aceleração para a esquerda, sendo a força da mola igual a zero quando o sistema entra em equilíbrio, entretanto o corpo gera uma velocidade maior para a esquerda sendo retardada pela força da mola, que agora atua para a direita. O corpo se desloca para a direita, passando pela posição de equilíbrio, atingindo a sua posição inicial, entretanto, na prática, essa posição não será alcançada devido a perda de energia do sistema, que pode ser desconsiderada quando pequena, como mostrado na Figura 02.

Figura 2 - Modelo com um grau de liberdade



Fonte: Arnold, 1995.

3-ABSORVEDORES DE VIBRAÇÃO

3.1 DEFINIÇÃO

As vibrações estão presentes em diversas áreas, para amenizar tal problema são utilizados recursos para estabilização das diversas situações encontradas no âmbito da engenharia, sendo um deles, os absorvedores de vibração. Silva (2000) classifica em duas classes o controle de vibrações, sendo elas, controle passivo e controle ativo.

Controle passivo se caracteriza pela não necessidade de energia externa para seu funcionamento, entretanto o controle ativo há uma necessidade de sensores e transdutores para captação das vibrações para que se aplique forças através de um ou mais atuadores no sistema, neutralizando, assim, as vibrações. Silva (2000) relata os estudos de Frahm onde são nomeados como absorvedores dinâmicos ou absorvedores de Frahm, sua forma de atuação no sistema consiste em uma mola com pouco amortecimento, capaz de absorver as vibrações, transferindo a energia para ela, reduzindo o impacto no sistema primário. De uma maneira geral o absorvedor dinâmico de vibração (ADV) são dispositivos que quando conectados ao sistema oscilatório seja capaz de reduzir os níveis de energia de vibração do sistema primário.

3.2 TLD E TLCD

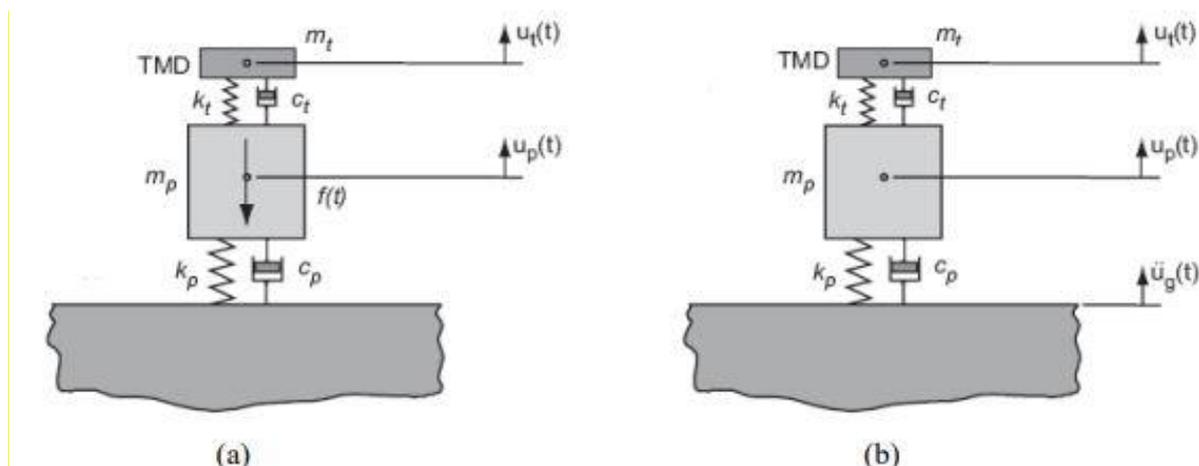
Todas as estruturas possuem amortecimento interno, que são provenientes de diversos fatores como: atritos, geração de calor, deformações plásticas, sons dentre outros. O amortecimento nada mais é que um fenômeno por onde a energia mecânica é dissipada. Para que a estrutura resista as cargas dinâmicas e haja o mínimo de amplitude dos deslocamentos, as mesmas precisam de sistemas de controle das vibrações (FREITAS, 2017).

Os sistemas de controle podem ser classificados como: ativos, que são aqueles que dissipam energia da estrutura utilizando a energia externa através de um atenuador pneumático ou hidráulico; semiativo, que funcionam com bateria e não a introdução de energia mecânica; passivos, que não necessitam de uma fonte de energia externa (FREITAS, 2017). Abreu (2008) ressalta que os sistemas de controle passivos de vibrações proporcionam um melhor desempenho funcional e um maior conforto.

Conforme Abreu (2008) o TMD, Amortecedores de Massas Sintonizadas ou, do inglês Tuned Mass Dampers, é um tipo de sistema de amortecimento passivo, o qual

consiste em uma mola e um amortecedor em paralelo, permitindo dissipar a energia de uma massa adicional, conforme a Figura 03. Essa reação simultânea mola-amortecedor nos permite minimizar os níveis de vibração (ABREU, 2008). Abreu (2008) ressalta ainda que “a frequência natural do TMD é sintonizada para uma frequência particular, referente a um modo de vibração específico”.

Figura 3 - Exemplo de TMD



Fonte: Abreu, 2008.

Dentre os amortecedores passivos encontram-se também os amortecedores líquidos sintonizados, ou apenas TLDs, do inglês “Tuned Liquid Damper”. Os dispositivos TLDs, possuem uma técnica clara e eficiente no aumento do amortecimento de uma estrutura, utilizado no controle passivo e assemelha-se ao princípio de funcionamento dos TMD’s (ABREU, 2008). De acordo com Moutinho (1998) e Abreu (2008) controle passivo de vibrações em estruturas possibilita suavizar os níveis de vibração excessivos sem a necessidade de fonte de externa de energia, que segundo Abreu (2008), possibilita o melhor desempenho funcional da estrutura.

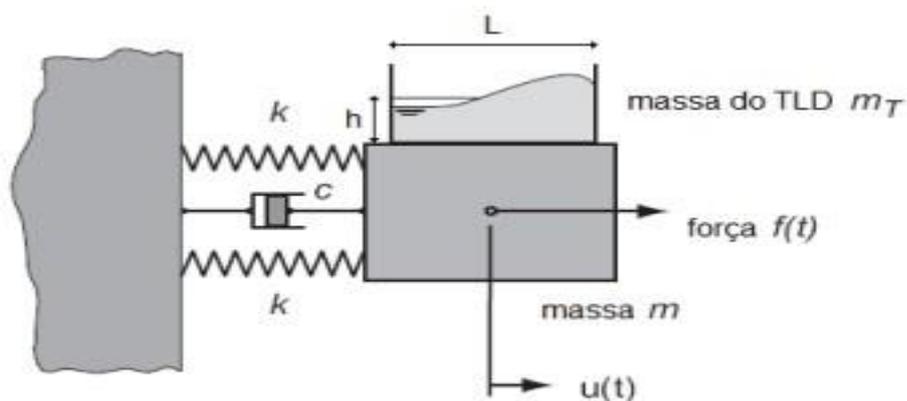
O sistema TLD é definido pelo fluxo de uma massa secundária que é introduzida no sistema primário da estrutura (ABREU, 2008). A gravidade age como força restauradora do sistema e o balanço da onda gerada na superfície livre do líquido quando o reservatório sofre uma ação horizontal gera uma dissipação de energia (ABREU, 2008). Já Freitas (2017) explica sua forma de atuação a partir da primeira lei de Newton, ou seja, aplicando uma aceleração para a direita, em um edifício esbelto com um reservatório na parte superior, a água contida no reservatório terá uma resposta de atuação no sentido contrário a força aplicada, por inércia, fazendo assim o contrabalanceamento da movimentação da estrutura, diminuindo assim as amplitudes da vibração da estrutura. Para tal ação, o dispositivo é composto por um recipiente retangular ou circular com água (ABREU, 2008), como mostra a Figura 04:

Em seu estudo, Abreu (2008) cita um exemplo no qual foram utilizados estes dispositivos, localizada no Japão, na ponte-T, apresentou-se uma ótima taxa de eficiência, porém no decorrer de dez anos, uma porcentagem da água das caixas evaporou, o que gerou um decréscimo da sua efetividade.

Alkimim (2017) classifica TLD como uma classe de TMD, onde a água pode atuar como um absorvedor de vibrações dinâmicas para diminuir as oscilações da estrutura. Sua formulação é não linear devido ao efeito sloshing (movimento irregular do fluido próximo a sua superfície, ou devido a pequenas aberturas no reservatório, causando efeitos turbulentos).

Dentre os vários TLDs, existem os amortecedores oscilatórios sintonizados, do inglês “Tuned Oscillating Dampers” (TOD) e o amortecedores de coluna de líquido sintonizado, do inglês “Tuned Liquid Column Damper” (TLCD). O TODs têm o funcionamento baseado no fenômeno sloshing, porém apenas uma pequena quantidade de líquido presente no recipiente participa do processo, portanto para aumentar a efetividade do líquido é indicado os TLCDs. Sendo suas principais vantagens, correspondem ao baixo custo, baixa frequência de manutenção, e devido a sua forma de atuação, através da água, pode ser instalado junto ao reservatório (Alkimim, 2017).

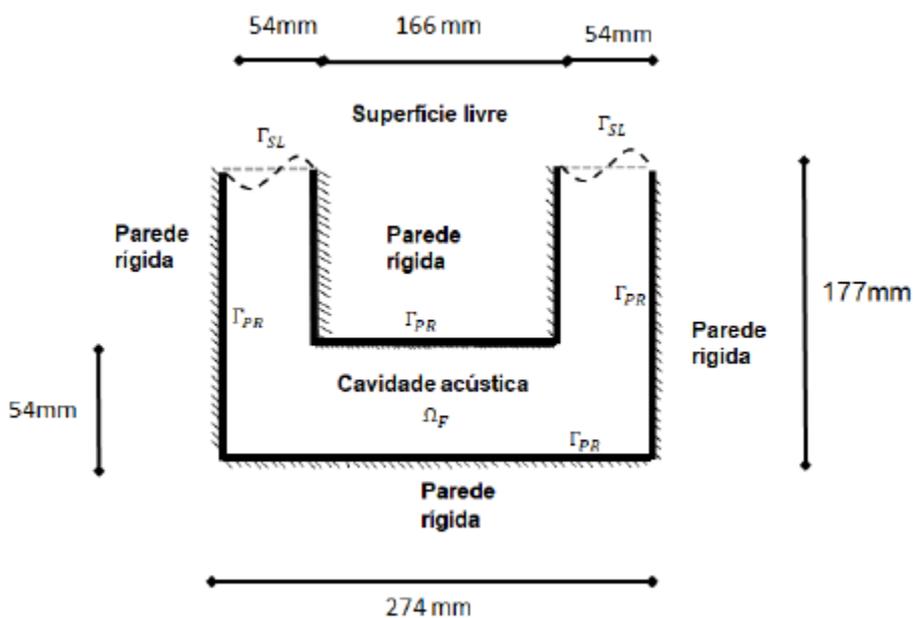
Figura 4 - Exemplo de tubo TLD



Fonte: Abreu, 2008.

No estudo de Silva (2018) foi analisado o efeito sloshing na superfície de um fluido, para tal, fez-se uso de um absorvedor líquido de coluna sintonizado. TLCD é descrito como uma cavidade em formato de U preenchida com água com o objetivo de reduzir a resposta dinâmica da estrutura. Por conter o efeito sloshing, a resposta do sistema é não linear. Silva (2018) cita ainda que, o TLCD foi originalmente estudado por Alkimim (2017), que descreveu um método para otimização de um amortecedor de líquido sintonizado sujeito a ventos estocásticos. A Figura 05 mostra o TLCD adotado com suas respectivas dimensões.

Figura 5 - Exemplo de TLCD



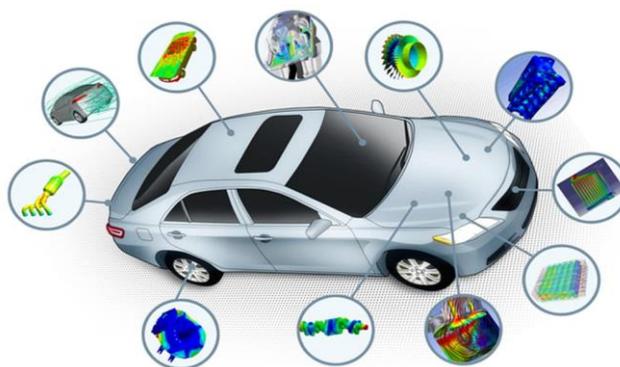
Fonte: Silva, 2018.

3.3 INTERAÇÃO FLUIDO-ESTRUTURA

Segundo Souza (2007), somente após a tragédia do Titanic, ocorrida em 1912, que iniciou-se as primeiras análises envolvendo fluido estrutura, focadas primeiramente em estruturas aquáticas para que então passassem a analisar problemas de vibrações acústico-estrutura que contribuíram notavelmente para a indústria aeroespacial. Acrescenta ainda que, uma estrutura em contato com qualquer fluxo de fluido estará sujeito aos efeitos de vibrações e é a partir do momento em que a estabilidade estrutural é alterado que os efeitos das interações fluido-estrutura deve ser consideradas no sistema. Logo, podemos entender que é de grande importância o estudo da interação fluido-estrutura (IFE) em problemas de engenharia. Partindo desse ponto, é fundamental a compreensão do que é a (IFE), para tal Silva (2018) explica sobre os problemas de interação acústica entre fluido e estrutura, onde afirma que tal campo de pesquisa pode ser dividida em duas categorias, denominadas vibroacústica e interação fluido-estrutura, que segundo o autor, podem ser definidas da seguinte forma: a primeira há o contato entre o sólido e um fluido acústico usualmente utilizado para análise de problemas envolvendo radiação e transmissão de som; a segunda, interação fluido estrutura, Silva (2018) explica que é usualmente utilizado em problemas envolvendo cavidades preenchidas total ou parcialmente por fluidos densos, como a água.

Existem vários trabalhos onde é definido o que é interação fluido estrutura, dentre eles podemos destacar o trabalho de Amaral (2016), que define a interação fluido estrutura (IFE) como o acoplamento de leis de diferentes físicas, especialmente a fluido-dinâmica e a mecânica estrutural e que este acoplamento leva em consideração o campo de pressão e os efeitos diretos desses carregamentos na estrutura. Acrescenta ainda que existem diversos componentes que podem ser analisados utilizando IFE e cita algumas delas, como válvulas industriais, tubulações que transportam fluidos a alta temperatura, rotores de máquinas rotativas, turbinas eólicas, entre outras. Amaral (2016) completa dizendo que, na maioria das formulações envolve múltiplas físicas e que hoje este tipo de estudo está mais viável e amplamente utilizado. Para evidenciar o quão importante é o estudo da (IFE) pode-se observar a Figura 6 onde demonstra a quantidade de peças de um automóvel que podem ser analisados por essa ótica.

Figura 6 - Elementos analisados em MEF ou IFE



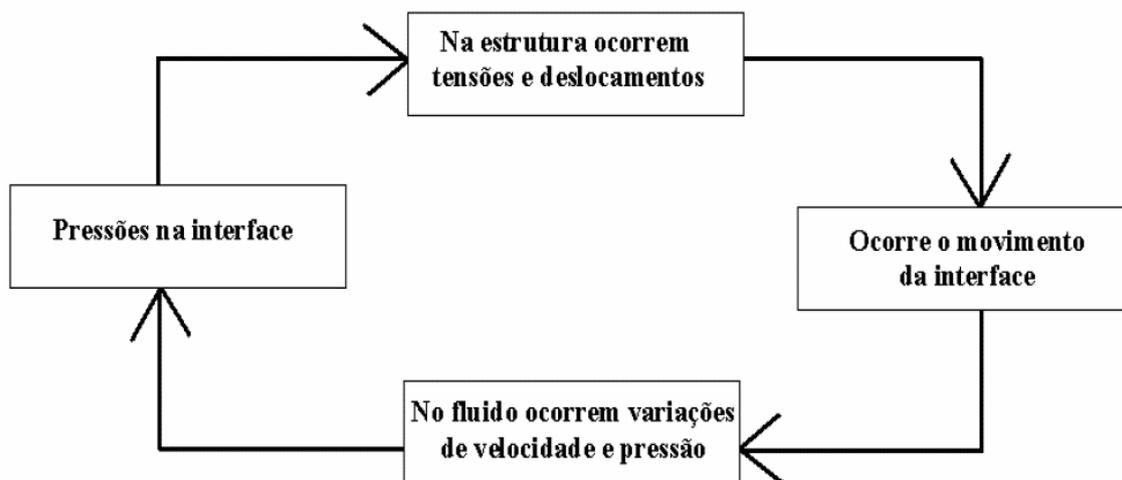
Fonte Amaral, 2016.

Como pode ser visto na Figura 06, vários componentes de um veículo atuam com a ação direta da interação fluido-estrutura e, devem ser analisados levando em consideração esses efeitos.

No trabalho de Cicigliano (2010) ele explica que a interação entre fluido-estrutura está na ação em que o fluido em movimento exerce sobre a estrutura e sua reação,

inviabilizando a antecipação das condições de fronteira tornando assim as análises complexas. (Figura 07)

Figura 7 - Ciclo de transmissão de pressão envolvendo fluido-estrutura



Fonte: Cicigliano, 2010.

Cicigliano (2010) acrescenta ainda que os métodos para análise envolvendo fluido-estrutura são divididos em dois grupos, métodos particionados e métodos monolíticos. Os métodos particionados consideram separadamente as forças produzidas pelo fluido e realizam posteriormente a análise dinâmica da estrutura, onde as equações governantes do fluido e da estrutura são integradas no tempo separadamente. Este método encontra grande aplicabilidade, como por exemplo, para avaliar as forças do vento atuando sobre grandes prédios ou pontes (PETRY, 1993 apud Cicigliano 2010).

Cicigliano (2010) completa dizendo que, quando os efeitos do escoamento sobre a estrutura constituem um ponto crítico do projeto, uma das formas mais seguras de avaliar este fator é a utilização de estudos experimentais. Nestes casos, normalmente é construído um modelo reduzido da estrutura, baseado em relações de similaridade dinâmica, submetido a uma simulação das condições de trabalho em túneis de vento ou túneis aerodinâmicos, dependendo do caso. Durante a simulação são feitas medições das informações desejadas, como reações da estrutura e pressões na superfície.

Dando procedimento ao entendimento do funcionamento do IFE, Souza (2007) explica que existe duas maneiras de abordar problemas de fluido-estrutura, pelas metodologias Lagrangeanas e Eulerianas. As Lagrangeanas utilizam o deslocamento como variável e o sólido como elástico (Zienkiewicz e Bettess 1978 apud Souza 2007).

A vantagem de utilizar esses métodos está no fato de que as matrizes por eles geradas em sistemas acoplados serem simétricas, facilitando a utilização em softwares de elementos finitos, porém, devido ao módulo de cisalhamento ser nulo a formulação para o fluido com graus de liberdade elevados gerando resultados espúrios. Esses valores espúrios ocorrem quando as frequências possuem valores muito altos e também para os valores muito próximo do zero sendo inviável a separação desses valores por uma inspeção visual simples, contudo para eliminar esse problema (Hamid , Ousset e Verchery 1978 apud Souza 2007) introduziu uma função de penalidade e o resultado numéricos se aproximam mais das soluções exatas e conseqüentemente os valores espúrios desapareceram. Já as formulações escalares ou Eulerianas descrevem o fluido com variáveis escalares, tais como pressão e velocidade. Essa formulação em contrapartida com a Lagrangeana possui menos números de graus de liberdade, porém ela conduz a matrizes não simétricas, o que dificulta o uso de solucionadores tradicionais.

Silva e Morais (2018) apresentou um trabalho onde realizou a modelagem estrutural de um fluido em cavidade na forma de amortecer o líquido sintonizado. Para tal, Silva (2018) utilizou as descrições Lagrangeanas e Eulerianas, para sólidos e fluidos, respectivamente. Apesar de serem campos diferentes, as duas mecânicas, sólidos e fluidos, possuem aspectos comuns e divergentes, como: nas duas as tensões de deslocamento são comuns, e podem ser observados efeitos volumétricos e gravitacionais, no entanto, possuem divergências quando comparamos os sólidos com os fluidos, já que um possui a capacidade de resistir tensões quando em repouso enquanto o outro não (Silva e Morais, 2018).

Silva (2018) diz ainda que, para o estudo de problemas envolvendo fenômenos vibro-acústicos é necessário fazer uma análise com a estrutura e o fluido desacoplado e depois fazer o mesmo com o acoplamento do fluido estrutural. E acrescentam a respeito do sloshing, que é definido pelos autores como um problema comum a qualquer recipiente líquido interagindo com um recipiente elástico ou estrutura onde a superfície livre pode apresentar vários tipos diferentes de movimentos na forma de troca de energia.

Cicigliano (2010) explica que, pelo fato das resoluções dos problemas de interação fluido-estrutura serem normalmente complexos a utilização de métodos numéricos é uma alternativa bastante adotada. De acordo com Cicigliano (2010) “a análise numérica consiste na simulação da interação por meio da implementação de um modelo matemático que represente o escoamento do fluido, a resposta da estrutura e o acoplamento das partes, baseado em métodos numéricos”.

Vários pesquisadores vêm estudando o assunto por meio desse método, acoplando algoritmos para Dinâmica dos Fluidos a algoritmos para Dinâmica dos Sólidos. Nestes métodos monolíticos, os domínios sólido e fluido são tratados como uma única entidade, sendo integrados simultaneamente no tempo.

Cicigliano (2010) ressalta que as simulações computacionais têm auxiliado a melhoria de projetos de estruturas submetidas à ação de fluidos, permitindo a realização de análises dos projetos e a verificação de efeitos de alterações de formas, modelos e técnicas empregadas na realização de projetos. Para Cicigliano (2010) os equipamentos modernos, aliados aos softwares específicos de engenharia e matemática aplicada, possibilitam maior precisão e ganho de tempo na simulação de problemas físicos, permitindo o estudo de um número muito maior de problemas, diminuindo as restrições feitas nos modelos, que caminham para aproximações cada vez mais próximas à realidade.

Segundo Souza (2007) existem diversas técnicas numéricas de se abordar problemas de fluido-estruturas, mas o que diferencia uma das outras é a maneira como o fluido é modelado e que nesse âmbito o método dos elementos finitos tem se destacado entre os demais por sua praticidade e resultados. Everstine (1997) complementa que para a utilização do (MEF) em problemas de interação fluido- estrutura a forma como as variáveis atribuídas ao fluido são modeladas pode representar vantagens ou desvantagens a análise.

4- MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS

Segundo Logan (2007) o método dos elementos finitos originou-se a partir de um método que fazia análise de tensão estrutural, utilizado no trabalho de Hrennikoff e McHenry em 1940, porém, só em 1956, quando as análises envolvendo computação tornaram-se reais que foi realizado o primeiro tratamento de elementos bidimensionais por Turner et al.. que derivaram matrizes de rigidez para elementos bidimensionais em tensão plana e delinearam o procedimento comumente denominado como o método de rigidez direta para obter a matriz de rigidez de estrutura total.

O resultado do trabalho de Turner *et al.* estimulou o desenvolvimento de equações de rigidez de elementos finitos expressas em notação matricial. E então, desde o início da

década de 50 foram feitos grandes avanços na aplicação do MEF em problemas complexos de engenharia.

Por isso, o MEF ainda vem evoluindo desde sua descoberta chegando em tempos contemporâneos ainda como uma ferramenta de enorme potencial para análise numérica citadas em diversos trabalhos, como o de Soriano (2003) que define o método dos elementos finitos como um ótimo instrumento numérico, muito empregado na resolução de problemas de meio contínuo, por conta de sua eficiência. Tendo se desenvolvido no campo estrutural, área em que é mais avançado, sendo peça fundamental na elaboração de estruturas contínuas e inovadoras, empregado pelos principais escritórios de projeto que possuem sofisticados preceitos de implementação do método.

5-ESTUDO DE CASO

5.1 PROCEDIMENTO

Inicialmente construiu-se um pórtico metálico tridimensional, contendo 4 apoios engastados (0 GDL) com 3 parafusos em cada fita metálica para sustentação da chapa metálica (base da estrutura). Para realização dos testes, foram criados furos a cada 10 centímetros nas fitas metálicas, para variação da altura da chapa metálica. Inicialmente foi criado um furo com 20 centímetros de altura, posteriormente 30 centímetros e 40 centímetros. As Figuras 08 (a) e (b) demonstram a ilustração do pórtico tridimensional modelado inicialmente no software AutoCAD 2019 e posteriormente desenvolvido pelos autores.

Após a confecção das estruturas, foram efetuados testes para determinação da frequência natural da estrutura, deslocamento vertical do flúido e obtenção da aceleração na horizontal da estrutura desacoplada e acoplada. A partir da modulação da estrutura, foram realizados testes, primeiramente com TLCD, para obtenção da frequência natural após um registro ilustrado na Figura 09, para captação do deslocamento vertical líquido, após uma perturbação inicial, conforme o gráfico da Figura 10.

5.2 MATERIAIS

A base da estrutura é constituída por uma chapa de aço Sae 1020 e seus apoios por uma chapa de de aço sem descrição, com um módulo de elasticidade de 75 GPa. As dimensões da base são 40x40 cm, sua espessura corresponde a 1 mm, os apoios tem dimensões 10x45 cm conforme a Figura 8 (a) chapas de aço e (b) chapa de aço Sae 1020, o suporte para engastamento dos apoios é montado com chapas de MDF (Medium Density Fiberboard). A relação das propriedades da chapa de aço Sae 1020 estão descrita abaixo, conforme a Tabela 01.

Tabela 1 – Propriedades físicas chapa de aço Sae 1020

Propriedades Físicas	(g/m ³)
Densidade	7.87 g/cm ³
Propriedades Mécnicas	(MPa)
Limite de resistência a Tração	420
Tensão de Escoamento	350
Módulo de Elasticidade	205000

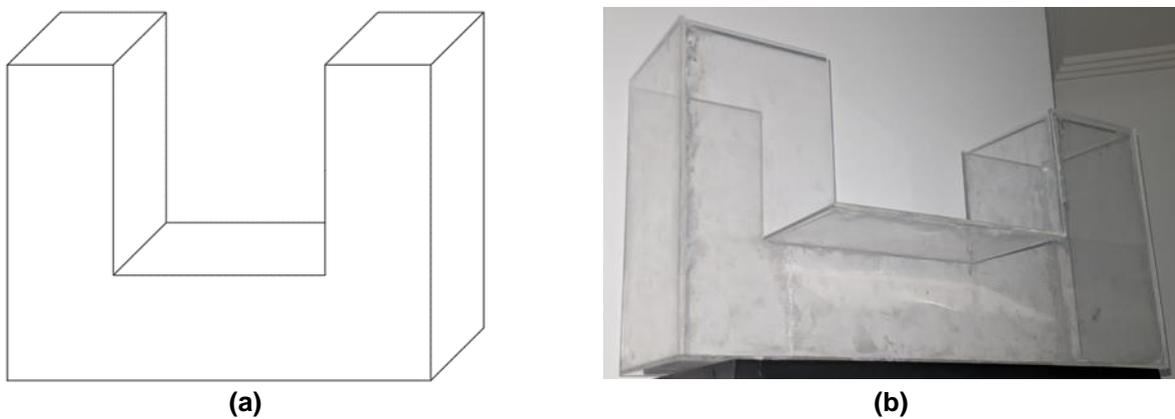
Fonte: Gelsonluz, 2017.

Figura 8 – Chapas metálicas e chapa de aço Sae 1020



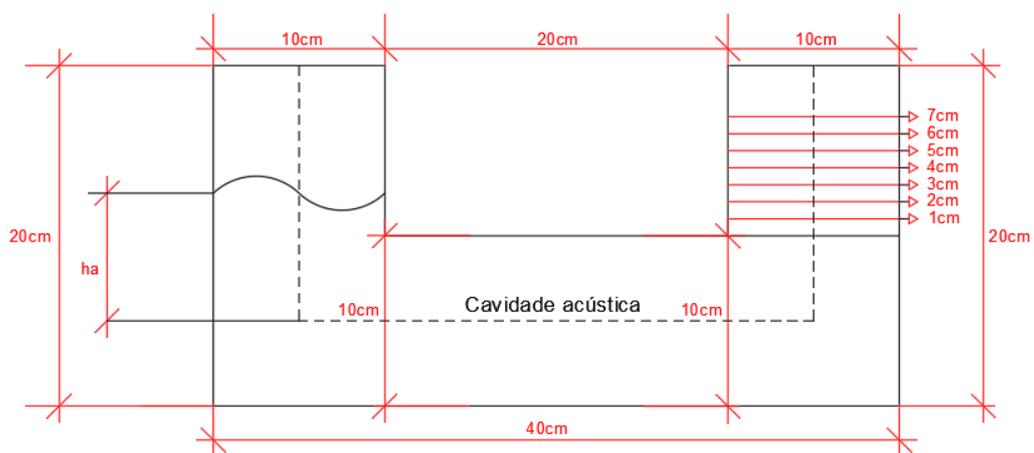
Fonte: Próprios autores.

Figura 9 - Modelagem TLCD (a), TLCD desenvolvido pelos autores (b)



Fonte: Próprios autores.

Figura 10– Representação TLCD em perspectiva frontal



Fonte: Próprios autores.

onde:

ha = altura lâmina d'água.

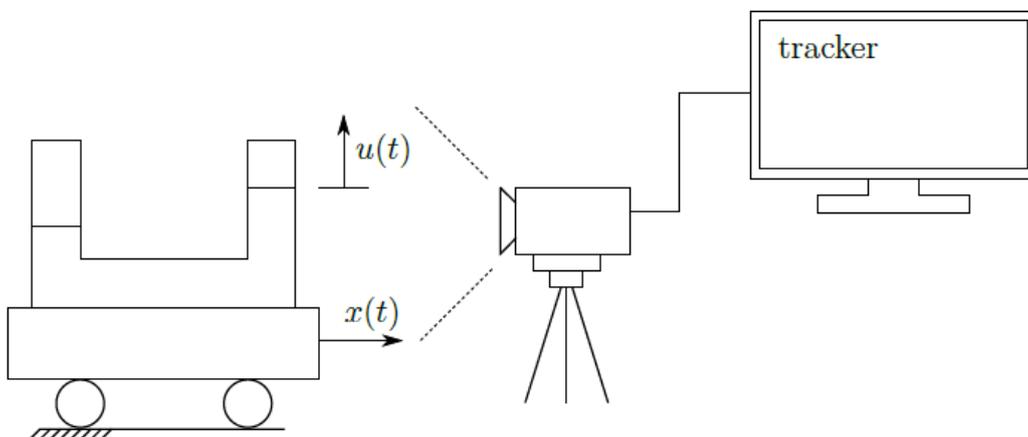
A estrutura do TLCD é composta por placas acrílicas, desenvolvidas para suportar o efeito sloshing. Sua modulação foi desenvolvida no software AutoCAD 2019, e posteriormente confeccionada pelos autores conforme a Figura 9 (a) e (b). Para realização dos testes foram estabelecidas alturas com intervalos de 1 centímetro para determinação do efeito sloshing de acordo com altura da lâmina d'água, conforme a Figura 10. As dimensões do TLCD correspondem a 20 centímetros eixo central, 10 centímetros de largura e para faces laterais e 20 centímetros de altura.

5.3-EXPERIMENTO

5.3.1 TLCD

Para obtenção das frequências naturais do TLCD, utilizou-se o software Tracker para obtenção da variação vertical lâmina d'água através de uma filmagem, onde se aplicou uma força horizontal na estrutura apoiada por barras circulares para o seu deslocamento, conforme ilustrado na Figura 11.

Figura 11 – Procedimento experimental para coleta de dados fluido



Fonte: Alkmim adaptada, 2017.

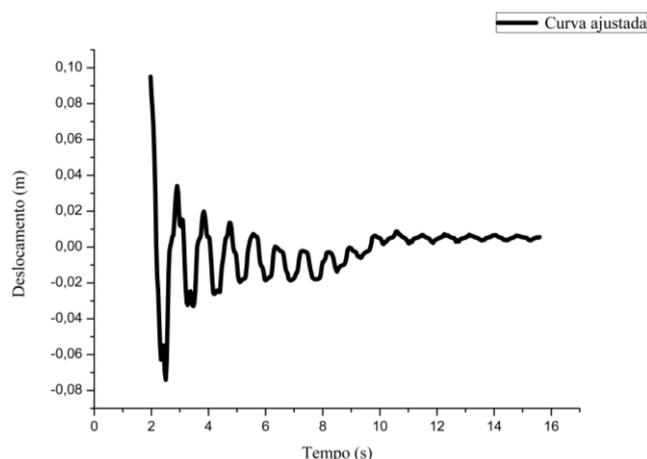
Após a coleta de dados da variação vertical da lâmina d'água obteve-se gráfico do deslocamento vertical líquido conforme a Figura 12. A partir dos dados coletados, calculou-se a frequência natural do TLCD, utilizando as seguintes formulas abaixo. O algoritmo utiliza um levenberg-Marquardt não linear mínimos, método dos quadrados onde A e C são constantes. (ALKMIM, 2017):

$$x(t) = Ae^{-\zeta\omega_n t} \sin(\omega_d t + \phi) + c \quad (1)$$

Para o cálculo da frequência utiliza-se a seguinte relação:

$$\omega_d = \omega_n \sqrt{1 - \zeta^2} \quad (2)$$

Figura 12 – Deslocamento vertical líquido adaptado



Fonte: Próprios autores.

Para os testes realizados, utilizou alturas de lâmina d'águas (ha) correspondentes a 6cm, 9cm e 12cm mostrado na Tabela 2.

Tabela 2 – Frequências naturais do TLCD obtidas através do método experimental

Frequência Naturais TLCD (Hz)	
ha (cm)	Experimental
6	1.24
9	1.11
12	1.03

Fonte: Próprios autores.

5.3.2 ESTRUTURA DESACOPLADA

Inicialmente construiu-se um pórtico metálico tridimensional, contendo 4 apoios engastados (0 GDL) com 3 parafusos em cada fita metálica para sustentação da chapa metálica (base da estrutura). Para realização dos testes, foram criados furos a cada 10 centímetros nas fitas metálicas, para variação da altura da chapa metálica. Inicialmente foi criado um furo com 20 centímetros de altura, posteriormente 30 centímetros e 40 centímetros. As Figuras 13 (a) e (b) demonstram a ilustração do pórtico tridimensional modelado inicialmente no software AutoCAD 2019 e posteriormente desenvolvido pelos autores.

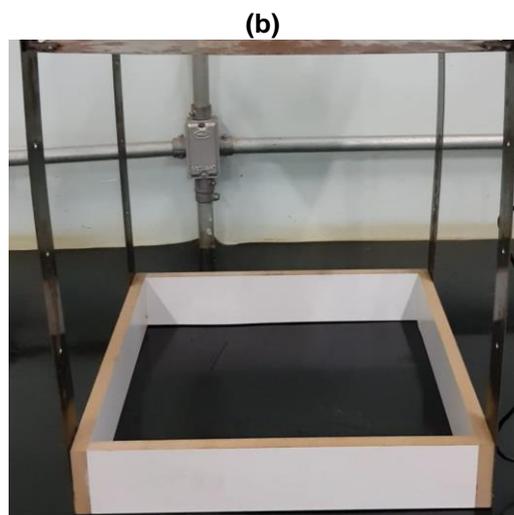
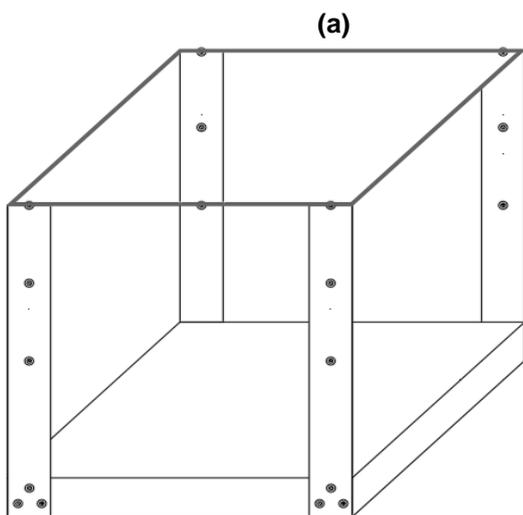
Após a confecção das estruturas, foram efetuados testes para determinação da frequência natural utilizando arduino UNO para coleta de dados após uma força aleatória aplicada na estrutura, obtendo os seguintes resultados: deslocamento vertical do flúido e obtenção da aceleração na horizontal da estrutura desacoplada e acoplada. A partir dos dados coletados utilizando as formulações 44 e 45 pode-se determinar a frequência natural da estrutura para alturas 10cm, 20cm e 30cm conforme a Tabela 3.

Tabela 3 – Frequência natural estrutura desacoplada

Frequência Naturais TLCD (Hz)	
Altura base (cm)	Experimental
20	1.24
30	1.11
40	1.03

Fonte: Próprios autores.

Figura 13 – Modelagem pórtico tridimensional (a), pórtico desenvolvido pelos autores (b)

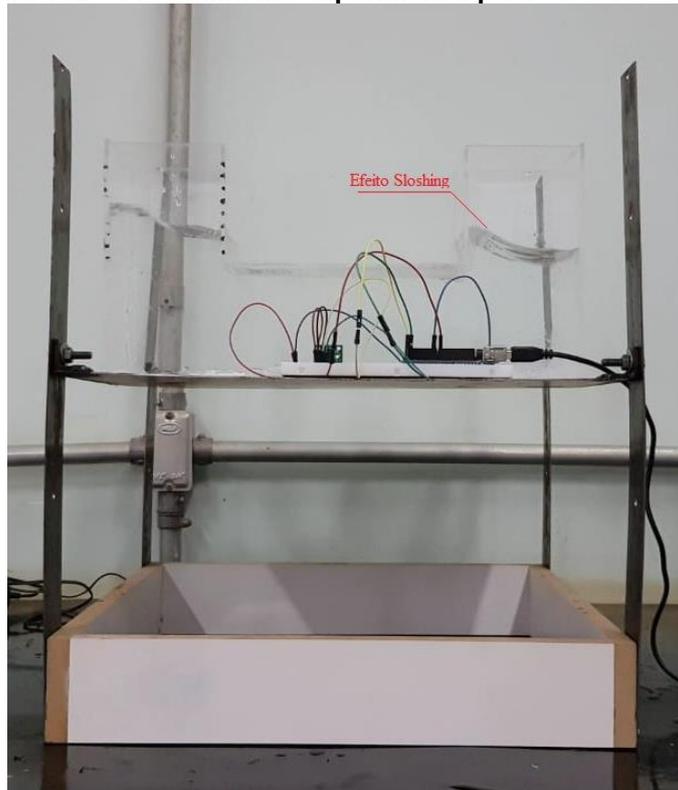


Fonte: Próprios autores.

5.3.3 Estrutura Aesacoplada

Em seguida foram efetuados testes com a estrutura acoplada ao TLCD juntamente com arduino UNO localizado em sua base, variando a altura da lâmina d'água e a altura da base da estrutura, para a determinação do seu comportamento conforme a Figura 14, para a análise dos resultados foram escolhidas três alturas lâmina d'água (h_a) para determinar os efeitos causados no pórtico, sendo 6cm, 9cm e 12cm. A Tabela 4 mostra os resultados para uma altura de 30cm.

Figura 142 – Procedimento experimental para coleta de dados



Fonte: Próprios autores.

Tabela 4 – Frequência natural estrutura acoplada

Frequência Naturais TLCD (Hz)	
Altura base (cm)	Experimental
20	0.25
30	0.22
40	0.20

Fonte: Próprios autores.

5.4 ANSYS

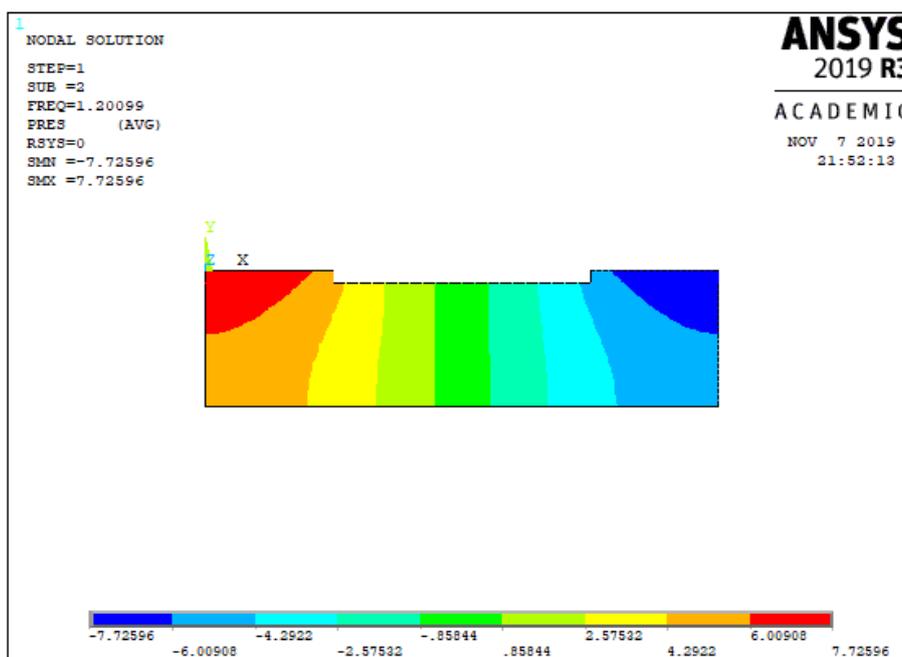
O software Ansys v19 R3 trata-se de um programa que utiliza de métodos numéricos baseado em elementos finitos, que tem como característica a possibilidade de realizar análises de diversos tipos de problemas envolvendo várias disciplinas como: eletromagnetismo, estruturas e fluidos dentre outras. O software é subdividido em diversas vertentes de programas cada um com suas respectivas característica e com foco em uma determinada disciplina.

O principal Motivo pelo o qual o software foi adotado nesse trabalho é o fato de que o mesmo pode obter resoluções de problemas envolvendo fluido-estrutura e realizar análises acopladas e desacopladas representando a configuração das deformadas modais tanto da cavidade quanto da estrutura.

Toda a modelagem numérica do trabalho foi realizada no ANSYS Mechanical APDL v19 R3 student license. E por se tratar de um versão de estudante a quantidade de nós fica limitada a 32 mil, porém segundo Silva(2018) A medida em que a malha cresce a porcentagem de erro relativo entre as Frequências diminuem, e de acordo com seu estudo 32 mil nós já é um valor suficiente para convergir A partir da modulação foi possível encontrar os respectivos valores, para frequência natural do TLCD mostrado na Tabela 05.

5.2.1 TLCD

Figura 15 - Deformadas modais numérica do TLCD



Fonte: Ansys V19 R3, 2019.

Tabela 5 – Frequência natural TLCD

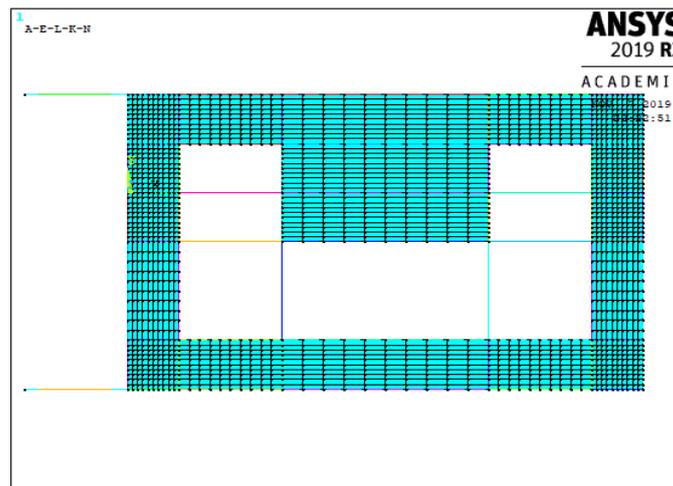
Frequência Naturais TLCD (Hz)	
ha (cm)	Ansys
6	1,20
9	1,09
12	1,04

Fonte: Próprios autores.

5.2.2 Resultado da Estrutura Desacoplada

Adotou-se uma altura padrão para a estrutura que é entendida pelo software através do valor da rigidez da mola (K) que nesse caso foi adotado sendo de 966,7. A densidade do aço adotada foi de 5071 e o modelo gráfico inserido no ANSYS está descrito na Figura 16:

Figura 16 - Modelo da estrutura desacoplada



Fonte: Ansys V19 R3.

Utilizando os dados informados anteriormente foi possível chegar nos seguintes valores informados na Tabela 06, ressaltando que apenas a frequência inicial é relevante para o presente estudo.

Tabela 6 - Frequências Naturais da estrutura desacoplada

Modo	Frequência (Hz)
1	0.32
2	1711.6
3	2899.7
4	4390.8

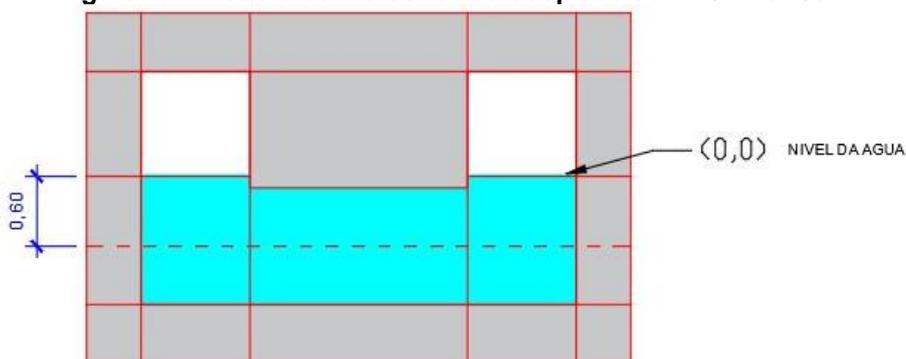
Fonte: Ansys v19 R3.

5.2.3 Resultado da estrutura acoplada ao TLCD

Após a simulação dos sistemas desacoplados realizou-se o estudo do problema acoplado onde considera-se o TLCD rigidamente conectado à placa superior da estrutura. Na simulação adotou-se a mesma malha convergida apresentada nos casos desacoplados, como também as mesmas alturas de fluido (há) adotadas nas simulações de fluido desacoplado.

Para a análise inicial adotou-se uma altura de coluna de água de $h=6\text{cm}$ que foi a mesma adotada no caso de fluido desacoplado, a modelo estrutura acoplada ao tclid com altura d'água de 6cm pode ser visualizado na Figura 17

Figura 17 - Modelo com a estrutura acoplada ao TLCD ha=6cm



Fonte: Próprios autores.

Após a modelagem no software seguindo os valores descritos anteriormente no presente trabalho foi possível obter a frequência inicial do modelo estrutural acoplado ao TLCD que pode ser visualizado na Tabela 07:

Tabela 7 - Frequências Naturais da estrutura acoplada ao TLCD ha=6cm

Modo	Frequência (Hz)
1	0.31
2	1.37
3	3.39
4	3.44

Fonte: Ansys v19 R3.

6-RESULTADOS E ANÁLISES

6.1 TLCD

Após os resultados numéricos e experimentais, efetuou-se comparativo entre os mesmos, comparando as frequências naturais do TLCD, estrutura desacoplada e estrutura acoplada para as alturas de ha 6cm, 9cm e 12 cm respectivamente utilizando as formulas 1 e 2. A Tabela 08 apresenta a comparação experimental e numérico e suas respectivas diferenças entre os mesmo.

Tabela 8 – Comparativo entre frequências naturais TLCD obtidas no estudo experimental e numérico

ha (cm)	Frequência Naturais TLCD (Hz)		
	Numérico Presente Estudo	Experimental	Erro (%)
6	1,20	1,24	3,22
9	1,09	1,10	0,90
12	1,04	1,03	-0,90

Fonte: Próprios autores.

Pode-se observar que o resultados experimentais atingiu valores próximos aos valores numéricos, não ocorrendo nenhuma desconformidade quando comparado aos resultados numéricos. Nota-se que os erros presente no atual estudo não ultrapassam 3,22%.

6.2 ESTRUTURA DESACOPLADA

Após o estudo TLCD, realizou-se o estudo comparativo entre as frequências naturais da estrutura desacoplada, numérico e experimental, para alturas 20cm, 30cm e 40cm respectivamente. A Tabela 09 exhibe os resultados comparativos e suas respectivas diferenças entre os mesmo. Observa-se que os erros relacionados as frequências naturais são próximas, não ultrapassando 2,38% de erro, comprovando uma boa concordância da estrutura numérica em relação ao estudo experimental. Nota-se ainda a diminuição da frequência em relação a lâmina d'água, ou seja, são diretamente proporcionais.

Tabela 9 – Comparativo entre frequências naturais da Estrutura desacoplada

Frequência Naturais Estrutura desacoplada (Hz)			
Altura base (cm)	Numérico Presente Estudo	Experimental	Erro (%)
20	0,43	0,42	-2,38
30	0,32	0,32	0
40	0,27	0,27	0

Fonte: Próprios autores.

Após o estudo TLCD, realizou-se o estudo comparativo entre as frequências naturais da estrutura desacoplada, numérico e experimental, para alturas 20cm, 30cm e 40cm respectivamente. A Tabela 9 exhibe os resultados comparativos e suas respectivas diferenças entre os mesmo. Observa-se que os erros relacionados as frequências naturais são próximas, não ultrapassando 2,38% de erro, comprovando uma boa concordância da estrutura numérica em relação ao estudo experimental.

6.3 ESTRUTURA ACOPLADA AO TLCD

Após o testes realizados com TLCD e estrutura desacoplada, efetuou-se o acoplamento entre os elementos considerando TLCD conectado rigidamente a base da estrutura. Para o resultados apresentados na Tabela 10, adotou altuas ha, 6cm, 9cm e 12 respectivamente, comparado os resultados em relação a estrutura desacoplada.

Pode-se observar um diminuição da frequência da estrutura acoplada em relação a estrutura desacoplada, ou seja, o acoplamento do TLCD da estrutura permite uma maior estabilidade. Percebe-se ainda uma discrepância dos erros, estando relacionados a altura da lâmina d'água próxima a borda do TLCD.

Tabela 10 – Comparativo entre Estrutura desacoplada e Estrutura acoplada ao TLCD para altura da base 30cm

Frequência Naturais Estrutura acoplada (Hz)			
ha (cm)	Numérico Presente Estudo	Experimental	Erro (%)
6	0,31	0,25	-24
9	0,25	0,22	-13,63
12	0,19	0,20	5

Fonte: Próprios autores.

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Devido a evolução da engenharia as estruturas estão ficando mais ousadas onde devido a processos de otimização estão ficando mais altas e esbeltas, adquirindo formas variadas. Com isso torna-se necessário um estudo aprofundado sobre as características de tais estruturas. Uma das características que sofrem influência é a vibração de tais estruturas, devido ao contato com o vento, abalos sísmicos, dentre outros. Dessa forma torna-se necessário o engenheiro civil aprofundar-se no estudo da dinâmica das estruturas e no controle de vibrações. O presente trabalho propôs a estudar um dispositivo de absorção de vibrações denominado absorvedor líquido de coluna sintonizado. O estudo desses absorvedores se fez elemento principal nesse trabalho, sendo focado em um tipo específico, o TLCD (Tuned Liquid Column Damper) que foi acoplado a um pórtico com o intuito de verificar a eficiência do absorvedor na redução da frequência.

No programa experimental inciou-se com o teste da estrutura e do absorvedor líquido de coluna sintonizado (TLCD) desacoplados com o intuito de determinar suas frequências naturais e aceleração do sistema com auxílio do arduino. Com o auxílio do programa Tracker e Origin determinou-se os gráficos e a equação referente ao movimento da estrutura e do fluido. Os resultados obtidos foram comparados com os resultados obtidos no software de elementos finitos Ansys Student com o intuito de verificar a precisão das medições realizadas no programa experimental. Observou valores próximos quando comparados os resultados numéricos e experimentais com um erro médio de 0,72% para o TLCD e de 0,92% para a estrutura, demonstrando eficiência na utilização de métodos simplificados para análise de problemas de fluido desacoplado.

Após a análise do sistema desacoplado realizou-se a análise do acoplamento entre o fluido e a estrutura notou-se uma diferença relevante entre os resultados numéricos e experimentais, com um erro realtivo médio de 12,96%. Tal erro deve-se ao acoplamento entre o TLCD e a estrutura no programa experimental e na convergência da malha de elementos finitos no ANSYS.

Observou-se que com o uso do TLCD para as alturas de coluna de água de 6cm e 9 cm ocorreu uma redução na frequência da estrutura demonstrando a eficiência do TLCD. Porém a altura de 12 cm apresentou uma discrepância no resultado demonstrando um aumento na frequência natural da estrutura. Este fato pode ser explicado devido a problemas a falta de controle no impulso inicial da estrutura.

Por fim o trabalho conseguiu atender o seu objetivo principal de analisar os efeitos gerados na utilização de absorvedores de vibrações do tipo TLCD acoplado em um pórtico metálico, demonstrando que é possível chegar em resultados relevantes com um baixo índice de erro relativo quando comparados com métodos numéricos mais precisos, obtendo resultados que demonstram que ao utilização do TLCD acoplado a estrutura pode gerar uma diminuição do efeito vibratório na mesma.

REFERÊNCIAS

ABREU, Eufrásio Manuel Silva. **Dimensionamento de sistemas de controle de vibrações para pontes pedonais**. 2008. 153 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, 2008.

ALKMIM, Mansour Hassan. **Análise de um amortecedor de coluna de líquido sintonizado em uma turbina eólica sujeita a carregamento aleatório**. 2017. 107 f. Dissertação

(Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Engenharia Mecânica, Universidade de Brasília, Brasília, 2017.

AMARAL, Luiz. Interação Fluido Estrutura: O que é? Disponível em: <<https://www.esss.co/blog/interacao-fluido-estrutura-o-que-e/>>.

ARNOLD, Edward. Engineering Vibration Analysis with Application to Control Systems- Butterworth-Heinemann. Great Britain: C.f.beards, 1995. 437 p.

ARNOLD, Edward. Engineering Vibration Analysis with Application to Control Systems- Butterworth-Heinemann. Great Britain: C.f.beards, 1995. 437 p.

CLOUGH, Rayw.; PENZIEN, Joseph. Dynamics of Structures. United States: Computers & Structures, 2003. 752 p.

FREITAS, Mario Raul. Análise dinâmica de edifícios equipados com amortecedores de líquido sintonizado assistida pelo software dynapy. 2017. 104 f. Monografia (Especialização) - Curso de Engenharia Civil, Faculdade de Tecnologia Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Brasília, 2017.

GENTA, Giancarlo. **Vibration Dynamics and Control**. Nova York: Springer Science+business Media, 2009. 812 p.

HARTOG, J.p. Den. Mechanical Vibrations. 4. ed. New York: Mcgraw-hill Book Company, Inc., 1956

LOGAN, Daryl L.; METHOD, A First Course In The Finite Element. A first course in the finite element method. 4. ed. Austrália: Thomson, 2007. 836 p

MARQUES, Rodrigo França Alves. Estudo teórico numérico de absorvedores dinâmicos de vibração ativos e adaptativos. 2000. 120 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2000.

MARQUES, Rodrigo França Alves. **Estudo teórico numérico de absorvedores dinâmicos de vibração ativos e adaptativos**. 2000. 120 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2000.

MIRLISENNA, Giuseppe. Método dos elementos finitos: o que é? Disponível em: <https://www.esss.co/blog/metodo-dos-elementos-finitos-o-que-e/>.

RAO, Singiresu. Vibrações mecânicas. 4. ed. São Paulo: Pearson, 2009. 424 p. Arlete simille marques.

SILVA, Agnaldo Antônio Moreira Teodoro da. Acoplamento fluido estrutura U-P não simétrica de problemas vibroacústicos e hidroelásticos por elementos finitos 2D isoparamétricos. 2018. 130 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Integridade de Materiais da Engenharia, Universidade de Brasília, Gama, Distrito Federal, 2018.

SILVA, Clarence W. de. VIBRATION: fundamentals and practice. Washington: Crc, 2000. 938 p.

SILVA, Douglas S.; NADAI, Eduardo A.; SIQUEIRA, Viviane Ribeiro de. Análise computacional da interação fluido estrutura de uma tubulação de água utilizando o software comercial Ansys. São José dos Campos: Faculdade de Tecnologia de São José dos Campos, 2017.