



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ESTRUTURAL E CONSTRUÇÃO CIVIL
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

PEDRO JOSÉ FURLANI VIDAL

**ANÁLISE DO POTENCIAL AMORTECEDOR DE CAIXAS D'ÁGUA SOBRE
VIBRAÇÕES DEVIDO AO VENTO EM EDIFÍCIOS DE CONCRETO**

FORTALEZA, CE

2015

PEDRO JOSÉ FURLANI VIDAL

**ANÁLISE DO POTENCIAL AMORTECEDOR DE CAIXAS D'ÁGUA SOBRE
VIBRAÇÕES DEVIDO AO VENTO EM EDIFÍCIOS DE CONCRETO**

Monografia submetida à Coordenação do Curso de Engenharia Civil da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial para obtenção de grau de Engenheiro Civil.

Orientadora: Professora Tereza Denyse P. de Araújo

FORTALEZA, CE

2015

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Biblioteca de Ciências e Tecnologia

V691a Vidal, Pedro José Furlani.
Análise do potencial amortecedor de caixas d'água sobre vibrações devido ao vento em edifícios de concreto. / Pedro José Furlani Vidal. – 2015.
61 f., enc.

Monografia (Graduação) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia,
Departamento de Engenharia Estrutural e Construção Civil, Graduação em Engenharia Civil,
Fortaleza, 2015.

Orientação: Profa. Dra. Denyse Pereira de Araújo

1. Construção de concreto armado. 2. Pressão do vento. 3. Engenharia de estruturas. I. Título.

CDD 620

PEDRO JOSÉ FURLANI VIDAL

ANÁLISE DO POTENCIAL AMORTECEDOR DE CAIXAS D'ÁGUA SOBRE
VIBRAÇÕES DEVIDO AO VENTO EM EDIFÍCIOS DE CONCRETO

Monografia submetida à Coordenação do
Curso de Engenharia Civil da Universidade
Federal do Ceará, como requisito parcial para
obtenção de grau de Engenheiro Civil.

Aprovada em: 16 / 12 / 2015.

BANCA EXAMINADORA

Prof^a. Dr^a. ~~Tereza Denyse de Araújo~~ (Orientadora)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

~~Joaquim Eduardo Mota~~
Prof^a. Dr^a. Magnólia Maria Campêlo Mota
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Joaquim Eduardo Mota
Universidade Federal do Ceará (UFC)

A Deus.

Aos meus avós, Nortpool (*in memoriam*) e
Terezinha.

AGRADECIMENTOS

A Deus, pela força e pela determinação que me foram dadas para persistir neste trabalho e na formação em engenharia civil.

À professora Tereza Denyse de Araújo, que aceitou orientar este trabalho apesar do tema incomum e incerto. Sem sua atenção, este projeto de graduação não teria chegado ao fim.

À professora Magnólia Maria Campêlo Mota, por ceder a planta baixa do edifício utilizado nas análises realizadas e pela ajuda dada no desenvolvimento deste trabalho.

Ao professor Olivier Dessombz, por me introduzir aos fenômenos dinâmicos em estruturas de engenharia civil.

Aos colegas que contribuíram na elaboração desta monografia e em minha formação, em especial: João Coelho Lima Verde Neto, Jamires Cordeiro Praciano, Jorge Virgílio de Almeida, Luiz Fernando Bez e Virgínia Bordignon. Estes são mais do que companheiros de jornada, são eternos amigos.

À minha mãe, Ticiania Bastos Furlani, e aos meus avós Terezinha Bastos Furlani e Nortpool Furlani (*in memoriam*), exemplos de esforço e de determinação.

À Ana Lídia de Almeida Castro, pelo amor, cumplicidade e paciência.

“Eu sei que não sou nada e que talvez nunca tenha tudo. Aparte isso, eu tenho em mim todos os sonhos do mundo.” (Fernando Pessoa)

RESUMO

Compreender como cada elemento estrutural contribui para o comportamento dinâmico de estruturas é importante para projetar edifícios corretamente. No Brasil, constroem-se caixas d'água para abastecimento no topo das edificações, e esta subestrutura cheia de líquido pode afetar o deslocamento global do edifício, amplificando ou reduzindo seu movimento, ou seja, podendo funcionar como um amortecedor de líquido sintonizado (ALS). Para verificar este comportamento, modela-se uma edificação de 14 andares e sua caixa d'água no programa de elementos finitos SAP2000 v14 (CSI, 2009), através de uma malha tridimensional. O movimento da água dentro do reservatório é simulado pelo modelo mecânico de Housner (1963). Resultados mostram que a estrutura de concreto do reservatório aumenta o deslocamento do sistema causado pela carga dinâmica do vento, enquanto a água nele armazenado pouco modifica o movimento lateral, de forma que o conjunto água/reservatório intensifica globalmente o deslocamento. Os efeitos das caixas d'água no comportamento dinâmico de estruturas não devem ser negligenciados nas etapas de projeto estrutural, mas o movimento da água pode ser ignorado quando se estiver trabalhando com pequenos edifícios.

Palavras-Chave: Edifícios de concreto armado. Controle passivo de vibrações. Vibrações devido ao vento. Amortecedores de líquido sintonizado.

ABSTRACT

Understanding as each structural element contributes to the dynamic behavior of the structure is important for a correct building design. Water supply projects in Brazil place water tanks at the top of structures. A large concrete substructure full of liquid placed over the roof of buildings may affect global lateral displacement, either by amplifying horizontal motion or by acting as a damping system known as tuned liquid damper (TLD). These effects are verified analyzing a 14-storey concrete construction and its reservoir. Modeling of the building and the water reservoir are made using the finite element software SAP2000 v14 (CSI, 2009), through a 3-D solid mesh. Water motion inside the tank is simulated using the mechanistic model proposed by Housner (1963). Results show that the tank's concrete structure raises lateral displacements caused by dynamic loads of wind. The water and its depth variation due to consumption do not affect lateral displacement considerably, meaning that the water plus tank ensemble raises lateral displacement. Water supply tanks effects over dynamic behavior should not be neglected during the structural design of buildings, but liquid motion may be ignored when designing small buildings.

Keywords: Concrete buildings. Passive vibrations control. Wind-induced vibrations. Tuned liquid dampers.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Amortecimento em navios por vasos comunicantes	8
Figura 2 – Modelo mecânico de Graham e Rodriguez (1951)	8
Figura 3 – Modelo de Yu.....	10
Figura 4 – Modelo mecânico de Housner.....	11
Figura 5 – Representação do modelo de Housner	11
Figura 6 – Planta-baixa do edifício estudado	15
Figura 7 – Perspectiva do edifício modelado utilizando o SAP2000 v14.....	16
Figura 8 – Caixa d’água do edifício simulado.....	17
Figura 9 – Aplicação do modelo de Housner através de elementos de barra.....	19
Figura 10 – Construção do modelo massa-mola equivalente	21
Figura 11 – Representação do carregamento dinâmico do vento.....	23
Figura 12 – Equivalência da carga de vento distribuída a forças localizadas	24
Figura 13 – Cálculo de $F_n(t)$	25
Figura 14 – Forma geral do pulso de vento aplicado	28
Figura 15 – Deslocamentos laterais devido ao vento – comparação massa-mola e elementos finitos (sem caixa)	28
Figura 16 – Principais modos de vibração da estrutura.....	30
Figura 17 – Modos onde a caixa vibra como estrutura acoplada	31
Figura 17 – Deslocamento do nó 6637 para sistema com caixa vazia, sem caixa e caixa com 1,7 m de água.....	32
Figura 18 – Deslocamento do nó 6637 para sistema com caixa vazia e caixa com 1,1 e 1,4 m de água.....	33
Figura 19 – Deslocamento do nó 6637 para sistema com caixa vazia e caixa com 0,5 e 0,8 m de água.....	33
Figura 20 – Comparação modelo massa-mola e modelo elementos finitos	34
Figura 21 – Comparação massa total impulsiva e modelo de Housner - $h = 0,5$ m.....	35
Figura 21 – Comparação massa total impulsiva e modelo de Housner - $h = 1,7$ m.....	35

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Maneiras de diminuir os deslocamentos induzidos em edifícios pelo vento.....	2
Tabela 2 – Parâmetros do concreto armado utilizado no modelo.....	16
Tabela 3 – Consumo <i>per capita</i> de água em função do padrão da residência.....	18
Tabela 4 – Parâmetros do TLD de Housner para as diferentes colunas d'água simuladas (<i>h</i>)	19
Tabela 5 – Valores máximos de $F_n(t)$ para cada pavimento.....	25
Tabela 6 – Comparação entre frequências de vibração massa-mola x elementos finitos (sem caixa d'água).....	27
Tabela 7 – Comparação entre frequências de vibração da estrutura com e sem caixa.....	29

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	1
1.1	Considerações Iniciais	1
1.2	Justificativa	3
1.3	Objetivos do Trabalho	3
1.4	Metodologia	4
1.4.1	<i>Modelos Representativos da Estrutura de Concreto</i>	4
1.4.2	<i>Estudo do potencial de amortecimento da caixa d'água</i>	4
1.5	Estrutura do Trabalho	5
2.	AMORTECEDORES DE LÍQUIDO SINTONIZADO	7
2.1	Histórico dos ALS	7
2.2	Modelo de Housner (1963).....	11
2.3	Modelo de Yu (1999).....	13
3.	MODELAGEM DO EDIFÍCIO PELO MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS	15
3.1	Estrutura Principal	15
3.2	Reservatório e Água Armazenada	17
3.3	Água Como ALS	18
4.	MODELAGEM DO EDIFÍCIO EM SISTEMA MASSA-MOLA E CÁLCULO DOS CARREGAMENTOS DINÂMICOS DE VENTO	21
4.1	Modelo Massa-Mola	21
4.2	Carga Dinâmica do Vento	22
5.	ANÁLISES REALIZADAS E RESULTADOS OBTIDOS	27
5.1	Validação do Modelo em Elementos Finitos.....	27
5.2	Efeitos da Caixa d'Água Vazia Sobre as Frequências de Vibração do Edifício	29
5.3	Influência da Caixa d'Água Sobre o Deslocamento Lateral do Edifício.....	31
5.4	Modelagem da Água Pelo Modelo de Housner ou Como Massa Impulsiva.....	34
6.	CONCLUSÃO E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	37
	REFERÊNCIAS	39

1. INTRODUÇÃO

1.1 Considerações Iniciais

Os grandes centros urbanos brasileiros são hoje vítimas de seu próprio crescimento: terrenos não ocupados são cada vez menores, menos numerosos, e mais caros, e a demanda por moradia continua a existir. Estes fatores, aliados ao aumento do rigor nas leis de uso e de ocupação do solo, fazem com que grande parte dos novos empreendimentos imobiliários se viabilize financeiramente e tenha maior lucro através da verticalização.

O aparecimento de construções cada vez mais altas e esbeltas tem como consequência o nascimento de novos desafios estruturais. Certos carregamentos (como o dinâmico gerado pelas rajadas de vento) passam a ter maior importância no projeto estrutural, sendo sua consideração capital para que o edifício tenha um desempenho satisfatório.

O vento é tido como uma carga acidental aplicada à estrutura (NBR 6118:2014), gerada por diferenças de temperatura e de pressão no ar. Este é constituído por uma parcela constante e outra flutuante. A primeira é devido à velocidade média do vento \bar{V} , que permanece invariável por pelo menos dez minutos, sendo assim modelada como carga estática para efeito de análise estrutural.

A segunda parcela, por sua vez, é devido às rajadas de vento, resultando em uma carga dinâmica que pode ocasionar, em estruturas altas e esbeltas, oscilações importantes na direção da velocidade média. Estes deslocamentos podem ser fonte de desconforto para os ocupantes, de modo que a amplitude de aceleração da estrutura não deve ultrapassar $0,1 \text{ m/s}^2$ (NBR 6123:1988).

No intuito de mitigar os deslocamentos horizontais causados pelo vento e também por outras excitações dinâmicas, como os terremotos, diversos meios de amortecimento estrutural são aplicados, como o desenho de estruturas com *design* aerodinâmico, o aumento da massa total e da rigidez da estrutura, o uso de dispositivos auxiliares de amortecimento ativos ou passivos, entre outros. Estes mecanismos encontram-se listados na Tabela 1.

Dentre os dispositivos auxiliares passivos, destacam-se os amortecedores de líquido sintonizado (ALS ou TLD, do inglês *tuned liquid damper*). Este tipo de amortecedor consiste em um reservatório rígido que contém uma camada rasa de líquido (FUJINO *et al.*, 1988), colocado no topo de um edifício. A movimentação da estrutura resulta em movimento do líquido, de modo que o mesmo exerce forças na parede do reservatório, limitando, assim,

os deslocamentos do topo da estrutura. A altura da coluna de líquido é ajustada de modo que a sua frequência fundamental de vibração seja a mesma do edifício que se deseja amortecer, obtendo assim a eficiência máxima do sistema.

Tabela 1 – Tipos de amortecedor para edifícios

Meio	Tipo	Método e/ou Objetivo	Observações
Design Aerodinâmico	Passivo	Melhora das propriedades aerodinâmicas da estrutura	Quinas arredondadas, aberturas na estrutura
		Aumento da massa do edifício	Custo elevado de material
Design Estrutural	Passivo	Aumento da rigidez da estrutura	Contraventamentos, membros estruturais robustos
		Adição de material com propriedades dissipativas, aumentando a viscosidade do sistema	SD, SJD, LD, FD, VED, VD, OD
Dispositivos Auxiliares de Amortecimento	Passivo	Adição de sistema mássico auxiliar para aumentar o amortecimento	TMD, TLD (ALS)
		Gerar uma força de controle usando efeitos de inércia para minimizar os deslocamentos	AMD, HMD, AGS
	Ativo	Gerar uma força de controle aerodinâmica para minimizar os deslocamentos	Rotor, suplementos aerodinâmicos
		Mudara a rigidez da estrutura em tempo real para evitar a ressonância	AVS

SD: Amortecedor de Aço ; SJD: Amortecedor de Junta de Aço; LD: Amortecedor de Chumbo; FD: Amortecedor de Atrito; VED: Amortecedor Viscoelástico; OD: Amortecedor de Óleo; TMD: Amortecedor de Massa Sintonizada; TLD: Amortecedor de Líquido Sintonizado; AMD: Amortecedor de Massa Ativa; HMD: Amortecedor de Massa Híbrido; AGS: Giro-Estabilizador Ativo; AVS: Rigidez Ativa Variável

Fonte: Adaptado de Kareem *et al.* (1999).

Podem-se destacar como vantagens da utilização de *tuned liquid dampers* o baixo preço inicial de aquisição de material, os baixos custos de manutenção e a facilidade de regulagem. Os ALS começaram a ser utilizados inicialmente no Japão para o controle de vibrações induzidas pelo vento em torres de controle em aeroportos e em edifícios altos (SOONG & SPENCER JR, 2002).

As caixas d'água de concreto utilizadas em edifícios no Brasil atendem certos requisitos básicos para serem consideradas como ALS: são reservatórios rígidos com água presentes no topo da estrutura. Seu volume total é composto por, pelo menos, a reserva técnica de incêndio e pelo volume consumido em 24 horas pelos moradores (NBR 5626:1998). Observa-se, então, que pode existir um potencial de amortecimento neste tipo de reservatório que, até então, não tem sido explorado.

1.2 Justificativa

Diante da tendência a verticalização nos grandes centros urbanos brasileiros, os efeitos dinâmicos do vento ganham cada vez mais importância no cálculo estrutural de edifícios. Além de rachaduras no acabamento e de danos estruturais causados pelos deslocamentos horizontais, carregamentos dinâmicos podem causar sensação de enjoo nos moradores (KAREEM, 1983), efeito nocivo à saúde humana.

Tornar uma estrutura de verticalização elevada mais resistente (pelo acréscimo na massa total ou na rigidez) com o intuito de suportar os carregamentos dinâmicos do vento é uma alternativa limitada, pois ela é dependente do tamanho do terreno onde se deseja construir (para a implantação de fundações e de pilares robustos) e implica em um consumo maior de material de construção, encarecendo o produto final e diminuindo as margens de lucro. Em contraste, a utilização de dispositivos auxiliares de amortecimento permite a construção de uma estrutura menos robusta, mas sem eliminar o alto custo final da edificação.

Utilizar elementos estruturais do próprio edifício como fonte adicional de amortecimento (por exemplo, as caixas d'água) apresenta uma oportunidade de obter os benefícios do uso de dispositivos auxiliares de amortecimento sem o ônus do aumento do custo final da obra. Morsy (2010) menciona que a necessidade de instalar tanques para combate a incêndios apresenta a oportunidade de utilização destes reservatórios como ALS, estando eles corretamente sintonizados (ou seja, na frequência fundamental de vibração da estrutura). Sendo a reserva de incêndio parte do volume da caixa d'água, este trabalho retoma uma questão já abordada na literatura, porém ainda não respondida, de forma que é importante verificar o potencial amortecedor das caixas d'água até então negligenciado.

1.3 Objetivos do Trabalho

Este trabalho tem como objetivo principal verificar o potencial de amortecimento dos reservatórios prediais de abastecimento em edifícios submetidos à ação dinâmica do vento. O objetivo principal pode ser traduzido nos seguintes pontos específicos:

- Verificar se a caixa d'água atende aos requisitos necessários para desempenhar o papel de ALS (relação massa de água/massa do edifício e frequência natural de vibração do reservatório);

- Verificar os deslocamentos causados pelas forças dinâmicas de vento no edifício em estudo, de acordo com o prescrito pela NBR 6123:1988;
- Comparar os deslocamentos do edifício com e sem caixa d'água, de forma a avaliar o efeito deste reservatório como ALS.

1.4 Metodologia

A metodologia adotada para a realização deste trabalho consiste no estudo do comportamento dinâmico de um edifício residencial construído em Fortaleza, considerando o movimento do líquido nas caixas d'água e seu possível amortecimento. Este estudo foi dividido em duas etapas distintas: desenvolvimento de modelos computacionais representativos da estrutura e estudo do potencial de amortecimento das caixas d'água (incluindo a verificação da importância da consideração do movimento da água no deslocamento lateral de edifícios).

1.4.1 Modelos Representativos da Estrutura de Concreto

A modelagem da estrutura do edifício estudado é feita de duas maneiras diferentes: com um sistema massa-mola discreto em MATLAB R2012a e com um modelo 3D em elementos finitos através do software SAP2000 V14 (CSI, 2009).

A utilização de dois modelos permite que eles sejam validados através da comparação de resultados. Comparam-se os valores fornecidos pelos dois modelos tanto em relação à frequência natural de vibração da estrutura como aos deslocamentos laterais devidos ao carregamento dinâmico do vento. Em ambos os modelos, o carregamento dinâmico do vento é calculado a partir das especificações presentes na NBR 6123:1988.

1.4.2 Estudo do potencial de amortecimento da caixa d'água

O estudo do movimento da água no reservatório se apresenta como um problema complexo, resolvido através do uso da equação de Navier-Stokes (com as devidas condições de contorno da caixa d'água) e de métodos numéricos (como o método dos elementos finitos). Igualmente, os programas de elementos finitos permitem que a modelagem de um edifício de concreto seja tão complexa e tão detalhada quanto se desejar.

Esta análise minuciosa não está no escopo inicial deste trabalho, de modo que modelos mecânicos simplificados do conjunto edifício-reservatório são utilizados para a obtenção dos resultados de deslocamento amortecido. Neste contexto, escolheu-se o modelo analítico massa-mola para reservatórios elevados de Housner (1963) para a análise e representação de ALS.

Independentemente da expressividade do efeito amortecedor da caixa d'água, esta etapa busca verificar o efeito global do reservatório no comportamento dinâmico de um edifício de concreto.

1.5 Estrutura do Trabalho

Esta monografia é composta por seis capítulos, descritos a seguir. O primeiro capítulo é esta introdução, que busca apresentar de maneira generalizada os métodos de amortecimento utilizados em edificações, o problema a ser estudado, sua justificativa, os objetivos e a metodologia adotada para o desenvolvimento do trabalho.

O segundo capítulo traz uma revisão bibliográfica cronológica da tecnologia dos ALS e suas diferentes aplicações, bem como a apresentação dos modelos mecânicos de Housner (1963) e Yu (1999).

O terceiro capítulo introduz o edifício residencial utilizado na análise dos efeitos da caixa d'água, além de mostrar como foi feita a modelagem da estrutura por elementos finitos utilizando o SAP2000 v14 (CSI, 2009). Este tópico apresenta, também, as hipóteses simplificadoras consideradas no modelo.

O quarto capítulo retrata o segundo modelo da estrutura, o sistema massa-mola, utilizado para validação do modelo em elementos finitos. Ainda nesta seção, descreve-se o cálculo dos esforços dinâmicos do vento segundo a norma NBR 6123:1988.

O quinto capítulo apresenta as análises realizadas, desde a validação do modelo em elementos finitos até a verificação do efeito da variação de volume de água no reservatório no comportamento global da estrutura submetida ao carregamento de vento dinâmico. Esta mesma seção contém também a discussão dos resultados.

No sexto capítulo são feitas as conclusões finais sobre as análises realizadas, de forma a atender os objetivos do trabalho. Ao fim, são feitas sugestões para próximos trabalhos que voltem a abordar o tema discutido nesta monografia.

2. AMORTECEDORES DE LÍQUIDO SINTONIZADO

Com a evolução dos métodos construtivos e com o desenvolvimento da engenharia estrutural, tornou-se possível construir edificações cada vez mais altas. Estas estruturas, mais esbeltas e flexíveis, trouxeram novos desafios para os projetistas, pois se tornaram mais sensíveis aos carregamentos dinâmicos, como o vento e os tremores de terra.

Assim como a estabilidade estrutural, o conforto dos usuários que utilizam estas estruturas também é um fator importante a se considerar. Além do já citado desconforto (enjoos) devido aos movimentos laterais de edifícios altos, é importante ressaltar o caso de torres de controle em aeroportos, onde as vibrações podem aumentar ainda mais os níveis de estresse dos profissionais responsáveis por ordenar o tráfego aéreo (TAMURA *et al.*, 1995).

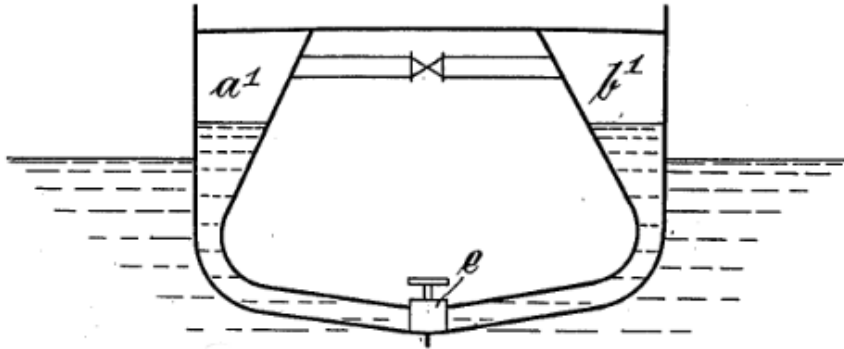
Buscando a integridade estrutural e a qualidade humana de vida e de trabalho, desenvolveram-se métodos de controle de vibrações, motivando a aplicação de dispositivos auxiliares de amortecimento em construções. Entre estes dispositivos, podem-se destacar os amortecedores de líquido sintonizado.

Os ALS são definidos como tanques parcialmente preenchidos com líquido – ou seja, de superfície livre – que combatem vibrações através da movimentação do líquido, seja por atrito interno do líquido, pelo atrito com as paredes do reservatório, dentre outros. Nas torres e edifícios, estes reservatórios são locados próximo do topo da estrutura, de modo a minimizar os maiores deslocamentos e acelerações horizontais.

2.1 Histórico dos ALS

As primeiras aplicações de amortecimento com o uso de reservatórios com líquido datam de 1902 e foram realizadas pelo engenheiro alemão Hermann Frahm, na indústria naval. A técnica desenvolvida consistia em um sistema de vasos comunicantes cheios de água acoplados a navios, no intuito de combater as excitações dinâmicas causadas pelas ondas do mar (DEN HARTOG, 1964) através do movimento das colunas de água, evitando o tombamento da embarcação (Figura 1), ou seja, utilizando os mesmos princípios que hoje constituem o ALS. Tal tecnologia foi aplicada às embarcações Bremen e Europa da frota alemã, inauguradas em 1928.

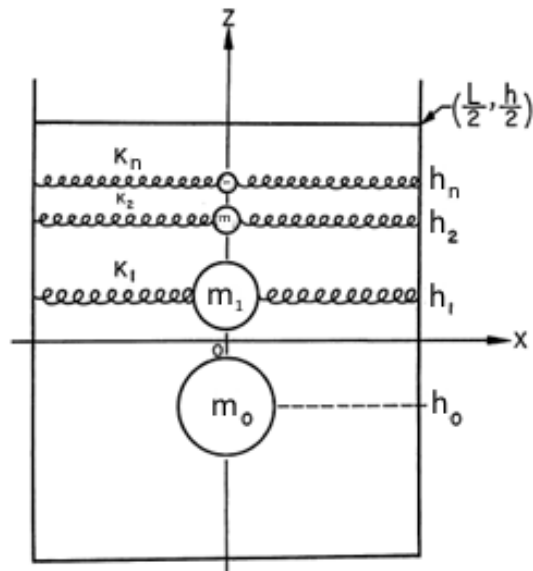
Figura 1 – Amortecimento em navios por vasos comunicantes



Fonte: Frahm (1910)

Anos depois, Graham & Rodriguez (1951) estudaram o movimento do combustível em tanques de aeronaves e de mísseis parcialmente cheios, devido aos problemas de estabilidade durante o voo dos mesmos. Através do desenvolvimento das equações de movimento do fluido, estes autores propuseram uma aproximação mecânica do comportamento do combustível através de um sistema massa-mola (FIGURA 2), de forma a caracterizar as forças que o líquido exerceria nas paredes do reservatório, se tornando a primeira contribuição para a criação de modelos mecânicos de ALS.

Figura 2 – Modelo mecânico de Graham e Rodriguez (1951)



Fonte: Adaptado de Graham & Rodriguez (1951)

Neste modelo introduzem-se os conceitos de massa impulsiva e de massa convectiva para reservatórios fundos. Em maiores profundidades, o líquido deixa de realizar um movimento diferenciado do restante da estrutura e passa a acompanhar o movimento do

tanque, agindo como uma massa sólida rigidamente ligada ao reservatório. A camada de líquido mais profunda é denominada impulsiva (representada por uma massa m_0), enquanto que a camada superior, de superfície livre, é chamada convectiva. Esta última ainda é subdividida em n massas menores m_n , associadas às constantes de elasticidade k_n (representando as diferentes frequências naturais de vibração da camada convectiva do líquido).

Housner (1963) pesquisou sobre o comportamento de reservatórios de água elevados em zonas de sismo, em razão do dano observado em estruturas deste tipo após os terremotos acontecidos no Chile em 1960. Este autor apresentou um modelo de representação de reservatório semelhante ao desenvolvido anteriormente para os tanques de combustível, porém limitado a apenas uma massa impulsiva.

Chandrasekaran & Krishna (1965) deram continuidade aos estudos de reservatórios elevados, com base em experimentos, com a análise de 13 reservatórios elevados submetidos à força do vento, no intuito de avaliar o comportamento dinâmico destas estruturas. Os resultados obtidos mostraram que, em reservatórios completamente cheios (sem superfície livre), a água não apresenta caráter convectivo e se comporta apenas como uma massa impulsiva.

Kareem & Sun (1987) observaram que o movimento de reservatórios com líquido apresentavam um potencial de amortecimento em estruturas ao simularem um edifício com reservatório e compararem os valores de deslocamento com um caso sem reservatório. Foi também concluído que um amortecimento mais eficiente acontecia quando a frequência natural de vibração do líquido era a mesma da estrutura. Este novo tipo de amortecimento foi chamado de “amortecedor de líquido agitado” (*tuned sloshing damper*) (KAREEM, 1990), sendo, depois, tratado de maneira mais geral como amortecedor de líquido sintonizado.

As primeiras instalações de ALS em estruturas civis foram feitas no Japão, em caráter experimental, na torre de controle do aeroporto de Nagasaki, em 1987 (TAMURA *et al.*, 1995). Foram instalados 25 reservatórios plásticos com água ao longo da estrutura da torre, e mediu-se com acelerômetros o comportamento da estrutura submetida à carga do vento.

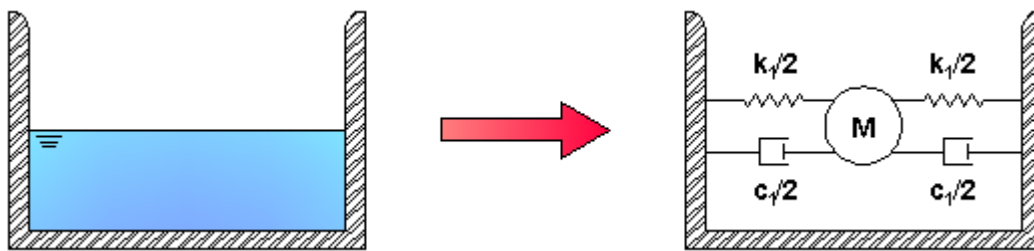
Os tanques foram calibrados de modo a ter sua frequência de ressonância próxima à frequência fundamental da estrutura. Os resultados obtidos mostraram uma redução de 44% nos deslocamentos no topo da torre, de modo a confirmar a eficiência deste método de amortecimento em edificações. Ainda em 1987, uma aplicação similar foi feita na torre do

porto de Yokohama; em 1992, no hotel Shin-Yokohama Prince. Ambas as aplicações forneceram resultados satisfatórios de amortecimento.

Tamura (1995) cita também que o desempenho dos amortecedores pode ser melhorado através da adição de partículas sólidas no sistema, cuja colisão aumentaria a quantidade de energia dissipada. Com a mesma intenção, Kareem *et al.* (1999) abordaram o uso de telas dentro dos reservatórios. Tais técnicas são necessárias para a aplicação deste tipo de dispositivo auxiliar em estruturas onde a área disponível é um fator limitante para as instalações.

Yu (1999) desenvolveu uma nova representação mecânica dos ALS considerando o comportamento não linear do amortecimento. Ele propôs um modelo massa-mola-amortecedor não linear (FIGURA 3) para reservatórios rasos (que só possuem massa impulsiva), mais preciso que os modelos até então apresentados.

Figura 3 – Modelo de Yu



Fonte: Autor

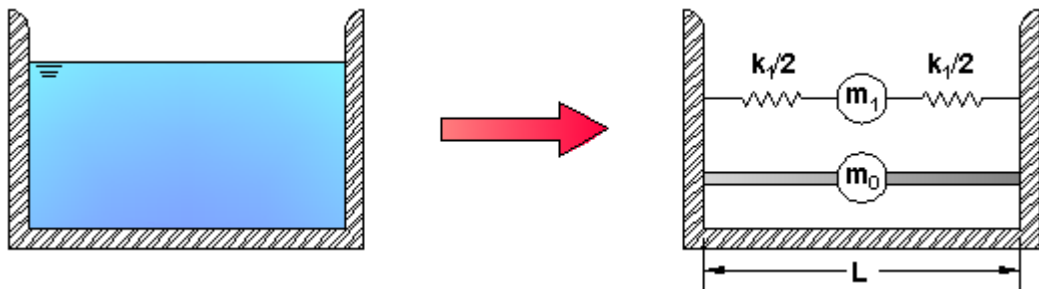
Quanto à utilização de reservatórios pré-existentes como fonte de amortecimento, Kitada *et al.* (1992) utilizaram reservatórios de aquecimento para sistemas de ar-condicionado, obtendo uma redução efetiva da aceleração lateral em uma estrutura metálica de doze andares. Kareem *et al.* (1999) e Morsy (2010) propõem que reservatórios de suprimento de água podem ser modificados de forma a atingir parâmetros ótimos de amortecimento, como segmentar a estrutura em subcompartimentos.

Recentemente, ALS foram utilizados como soluções estruturais nas torres One King West (Toronto, Canadá, 2005) e One Rincon Hill (San Francisco, Estados Unidos, 2009) (MORSY, 2010).

2.2 Modelo de Housner (1963)

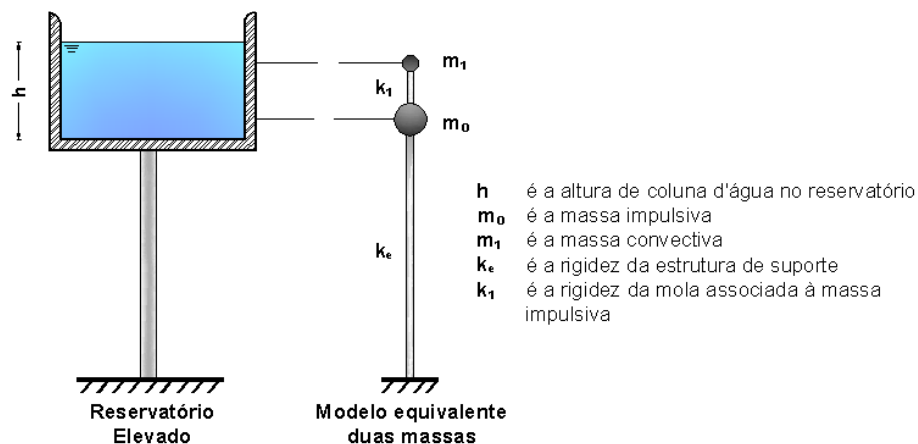
O modelo de Housner foi proposto inicialmente para caracterizar o comportamento de reservatórios elevados, mas sua aplicação como modelo ALS permite uma análise rápida dos efeitos do amortecedor na estrutura para um dado carregamento, ao custo de uma menor precisão. Conforme apresentado anteriormente, este modelo generaliza o comportamento do reservatório através de uma massa convectiva (m_1) associada a uma mola de rigidez k_1 e outra impulsiva (m_0) (FIGURA 4). Esta consideração sugere que, neste tipo de estrutura, o primeiro modo de vibração é suficiente para caracterizar a força exercida pela água na parede do reservatório. De forma sintetizada, o ALS passa a ser representado por um sistema de massa discreto de dois graus de liberdade (referentes aos deslocamentos horizontais do volume convectivo e do sistema reservatório/volume impulsivo), conforme ilustrado na Figura 5.

Figura 4 – Modelo mecânico de Housner



Fonte: Autor

Figura 5 – Representação do modelo de Housner



Fonte: Adaptado de Livaoğlu & Doğangün (2006)

As equações para o cálculo das massas e da rigidez equivalente da parcela convectiva foram propostas inicialmente em 1963 e revisadas em 1976 por Epstein. Tem-se, então, que a massa impulsiva m_0 , a massa convectiva m_1 e sua rigidez equivalente k_1 são dadas pelas equações a seguir (EPSTEIN, 1976 *apud* LIVAOĞLU, 2008):

$$m_0 = 0,264 \cdot \frac{L}{h} \cdot \tanh\left(3,162 \cdot \frac{h}{L}\right) \cdot M \quad (1)$$

$$m_1 = 1,155 \cdot \frac{h}{L} \cdot \tanh\left(0,791 \cdot \frac{L}{h}\right) \cdot M \quad (2)$$

$$k_1 = 3,162 \cdot \frac{g}{L} \cdot \tanh\left(3,162 \cdot \frac{h}{L}\right) \cdot m_1 \quad (3)$$

onde M é a massa total da água no tanque, h é a altura da coluna d'água no reservatório, L é o seu comprimento e g é a aceleração da gravidade. A frequência de ressonância do reservatório, que leva em consideração apenas a massa convectiva, pode ser calculada como a frequência de um movimento harmônico simples, tal que

$$f = \frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot \sqrt{\frac{k_1}{m_1}} \quad (4)$$

A equação de movimento do sistema pode ser escrita matricialmente, considerando a massa M_e da estrutura do reservatório e a rigidez da estrutura de suporte k_e , como

$$\begin{bmatrix} M_e + m_0 & 0 \\ 0 & m_1 \end{bmatrix} \cdot \ddot{\underline{u}} + \begin{bmatrix} k_e + k_1 & -k_1 \\ -k_1 & k_1 \end{bmatrix} \cdot \underline{u} = \begin{bmatrix} F_e \\ 0 \end{bmatrix}, \quad \underline{u} = \begin{bmatrix} u_e \\ u_1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

sendo F_e a força exercida sobre a estrutura do reservatório, u_e o seu deslocamento (e o da massa impulsiva associada) e u_1 o deslocamento fictício da massa convectiva.

2.3 Modelo de Yu (1999)

Yu propôs um modelo que melhor representa o comportamento não linear da água em movimento no ALS. A dissipação de energia devido à viscosidade do líquido é introduzida ao modelo através de um amortecedor, conforme representado na Figura 3.

Diferentemente do modelo anterior, o modelo de Yu foi desenvolvido para tratar apenas de reservatórios rasos, ou seja, cuja totalidade da massa de líquido (M) é convectiva (em termos do modelo de Housner, $m_0 = 0$ e $m_1 = M$), sendo L o comprimento do tanque e h a altura de coluna d'água que o preenche. A frequência fundamental de vibração do líquido pode ser determinada através de uma análise por ondas de superfície, e é dada pela seguinte equação (LAMB, 1945):

$$f = \frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot \sqrt{\frac{\pi \cdot g}{L} \cdot \tanh\left(\frac{\pi \cdot h}{L}\right)} \quad (6)$$

onde g é a constante gravitacional.

Sendo conhecidas a frequência fundamental do líquido e a massa convectiva, podem-se determinar os valores da rigidez (k_1) e da viscosidade (c_1) associadas ao movimento da água por (YU *et al*, 1999):

$$k_1 = \begin{cases} 1,075 \cdot \left(\frac{A}{L}\right)^{0,007} \cdot M \cdot (2 \cdot \pi \cdot f)^2, & \text{se } \frac{A}{L} \leq 0,03 \\ 2,52 \cdot \left(\frac{A}{L}\right)^{0,25} \cdot M \cdot (2 \cdot \pi \cdot f)^2, & \text{se } \frac{A}{L} > 0,03 \end{cases} \quad (7)$$

$$c_1 = \sqrt{M \cdot k_1} \cdot \left(\frac{A}{L}\right)^{0,35} \quad (8)$$

Onde A é a amplitude do movimento oscilatório do reservatório (não do líquido), quando submetido a um carregamento dinâmico qualquer. Desprezando a viscosidade da estrutura, pode-se escrever a equação de movimento do sistema de forma matricial, tal que

$$\begin{bmatrix} M_e & 0 \\ 0 & M \end{bmatrix} \cdot \ddot{\underline{u}} + \begin{bmatrix} 0 & -c_1 \\ -c_1 & c_1 \end{bmatrix} \cdot \dot{\underline{u}} + \begin{bmatrix} k_e + k_1 & -k_1 \\ -k_1 & k_1 \end{bmatrix} \cdot \underline{u} = \begin{bmatrix} F_e \\ 0 \end{bmatrix}, \quad \underline{u} = \begin{bmatrix} u_e \\ u_1 \end{bmatrix} \quad (9)$$

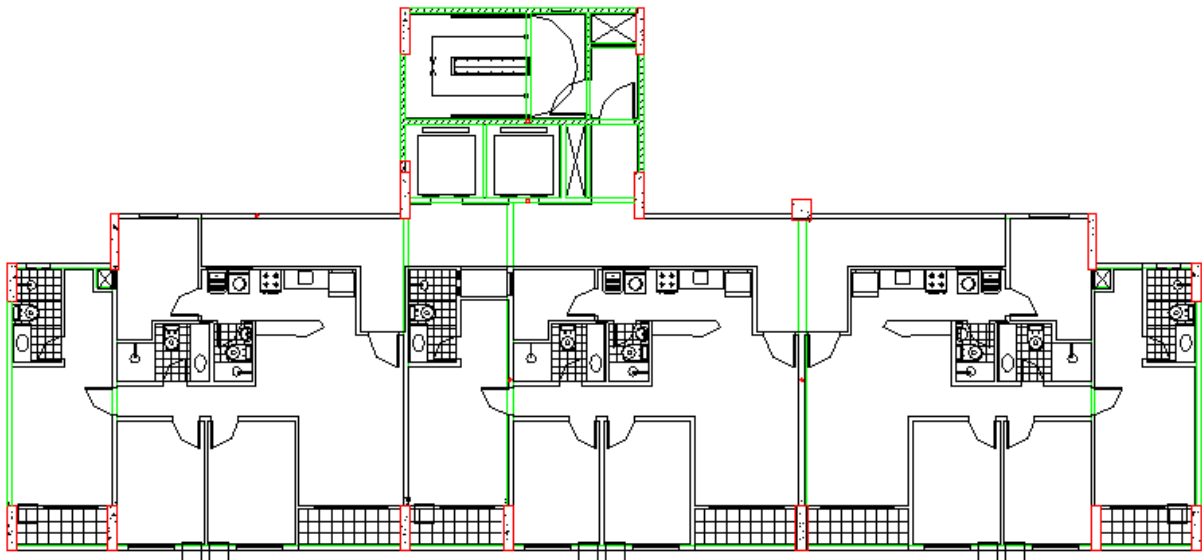
sendo F_e a força exercida sobre a estrutura do reservatório, u_e o seu deslocamento e u_l o deslocamento fictício da massa m_l , M_e é a massa da estrutura do reservatório e k_e sua rigidez. É importante frisar que a amplitude do movimento do reservatório não é constante, de forma que esta equação diferencial é não linear, sendo resolvida por métodos de integração numérica, como o método de Newmark.

3. MODELAGEM DO EDIFÍCIO PELO MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS

A estrutura estudada consiste em um edifício residencial de 14 pavimentos, de altura total de 40,5 m, localizado na cidade de Fortaleza. Cada andar abriga três apartamentos unifamiliares conforme apresentado na planta-baixa da Figura 6. Destes 14 pavimentos, 13 são habitáveis, totalizando 39 apartamentos. A estrutura possui também dois subsolos para estacionamento, além de caixa d'água para abastecimento das residências que está localizada acima da última laje.

Para modelar a estrutura, utilizou-se o *software* de elementos finitos (EF) SAP2000 v14 (CSI, 2009). As particularidades desta modelagem são descritas nas seções subsequentes.

Figura 6 – Planta-baixa do edifício estudado



Fonte: Cedida pelo escritório Hugo A. Mota Consultoria Engenharia de Projetos S/C.

3.1 Estrutura Principal

A estrutura do edifício é construída em concreto armado. O pé-direito de cada pavimento é de 2,88 m, com exceção entre o térreo e a primeira laje, cujo valor é 3,06 m. Consideraram-se, como apoios, engastes perfeitos em todos os pilares no nível térreo. Para simplificar a análise a ser realizada, ignoraram-se os subsolos de estacionamento, pois sua grande robustez e a interação solo-estrutura restringem deslocamentos horizontais abaixo do nível do solo.

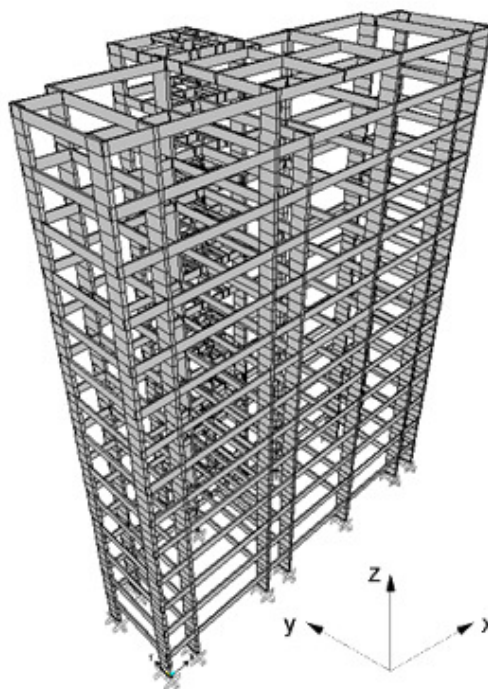
No modelo desenvolvido, não se consideram elementos como o revestimento e outras fontes de ações permanentes diretas, de forma que apenas a estrutura de concreto foi modelada. Vigas e pilares foram construídos no modelo de acordo com as plantas de forma da estrutura, enquanto as lajes foram substituídas por carregamentos equivalentes nas vigas e por condições de diafragma rígido em todos os andares. A Tabela 2 apresenta os parâmetros mecânicos adotados para o material concreto armado, considerado como uniforme e com comportamento linear elástico durante as simulações. Para o cálculo do módulo de elasticidade secante do concreto, considerou-se um traço feito com agregado granítico e com f_{ck} de 25 MPa, considerando as especificações da NBR 6118:2014. A parcela de comportamento dúctil da estrutura é desconsiderada. A Figura 7 mostra uma vista em perspectiva da estrutura modelada, ainda sem caixa d'água.

Tabela 2 – Parâmetros do concreto armado utilizado no modelo

Grandeza	Símbolo	Valor
Peso específico	γ	24525 N/m ³
Módulo de elasticidade secante	E_{cs}	24,15 GPa
Coefficiente de Poisson	ν	0,2

Fonte: Autor

Figura 7 – Perspectiva do edifício modelado utilizando o SAP2000 v14 (CSI, 2009)

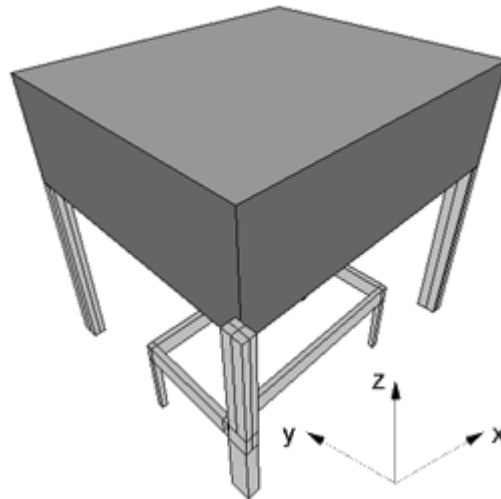


Fonte: Autor

3.2 Reservatório e Água Armazenada

A estrutura da caixa d'água consiste em um reservatório de concreto de 5,94 x 5,09 x 2,02 (m³) suportado por quatro pilares (FIGURA 8). Há também uma laje intermediária – chamada platô – onde se localizam mecanismos auxiliares do abastecimento de água. Tendo em vista que a análise de esforços e deslocamentos nas paredes do reservatório não é o objetivo deste trabalho, a estrutura do mesmo foi simulada de forma simplificada, utilizando-se placas rígidas e indeformáveis de concreto.

Figura 8 – Caixa d'água do edifício simulado



Fonte: Autor

O volume de água contido em uma caixa d'água é determinado pela NBR 5626:1998 e consiste na quantidade necessária para suprir o consumo dos moradores por 24h, acrescido ainda da reserva técnica de incêndio.

Segundo as Normas Técnicas para Projetos de Sistemas de Abastecimento de Água e Esgotamento Sanitário (CAGECE, 2010), o consumo *per capita* de água pode ser definido conforme a Tabela 3, quando não houverem dados de consumo medidos pela concessionária. Ainda de acordo com a mesma norma, o edifício modelado é considerado como sendo uma residência de alto padrão, devido à região na qual se localiza a construção e a área habitável do mesmo.

Tabela 3 – Consumo *per capita* de água em função do padrão da residência

Padrão da Residência	Consumo <i>per capita</i> total (L/hab/dia)
Alto	200
Médio-Alto	175
Médio (Região Metropolitana de Fortaleza)	162
Médio (interior)	150
Baixo (conjuntos habitacionais)	125
Baixo (ocupação irregular)	100

Fonte: Adaptado de CAGECE (2010)

Considerando que cada apartamento possui no máximo cinco ocupantes (dois ou três quartos, dependendo do tipo do apartamento), o volume de água calculado para o consumo dos habitantes é de 39 m³/dia.

A reserva técnica de incêndio, por sua vez, é determinada em cada estado pelo Corpo de Bombeiros da região. No Ceará, a Norma Técnica N°006/2008 determina que, para uma edificação residencial com área total entre 2.500 m² e 10.000 m² deve possuir uma reserva técnica de 4,5 m³, acrescida de 0,6 m³ para cada ponto de hidrante. São considerados 16 pontos de hidrante no edifício (14 pavimentos e dois subsolos), de forma que o volume total para combate de incêndio é de 14,1 m³. O volume total de água no reservatório é então a soma da parcela de consumo de um dia e da reserva de incêndio, 52,1 m³, o que corresponde a uma altura de coluna d'água de 1,76 m dentro da caixa d'água.

3.3 Água Como ALS

Para simular o comportamento da água no reservatório como ALS, optou-se por utilizar o modelo de Housner, tendo em vista que o SAP2000 v14 (CSI, 2009) possui rotinas que podem representar um mecanismo deste tipo. Tendo em vista que o consumo de água no reservatório varia ao longo do dia, o modelo de ALS deve ser aplicado a diferentes alturas de coluna d'água, de forma a verificar o amortecimento na estrutura para diferentes volumes armazenados. O volume mínimo presente na caixa d'água deve ser igual à reserva de incêndio (14,1 m³), o que corresponde à aproximadamente 0,5 m de água na caixa. O volume máximo é aproximado para 1,7 m.

Para cada altura de coluna d'água, os parâmetros do modelo de Housner foram calculados segundo o disposto na seção 2.2. A Tabela 4 mostra as diferentes profundidades de água simuladas, juntamente com suas correspondentes propriedades mecânicas de Housner.

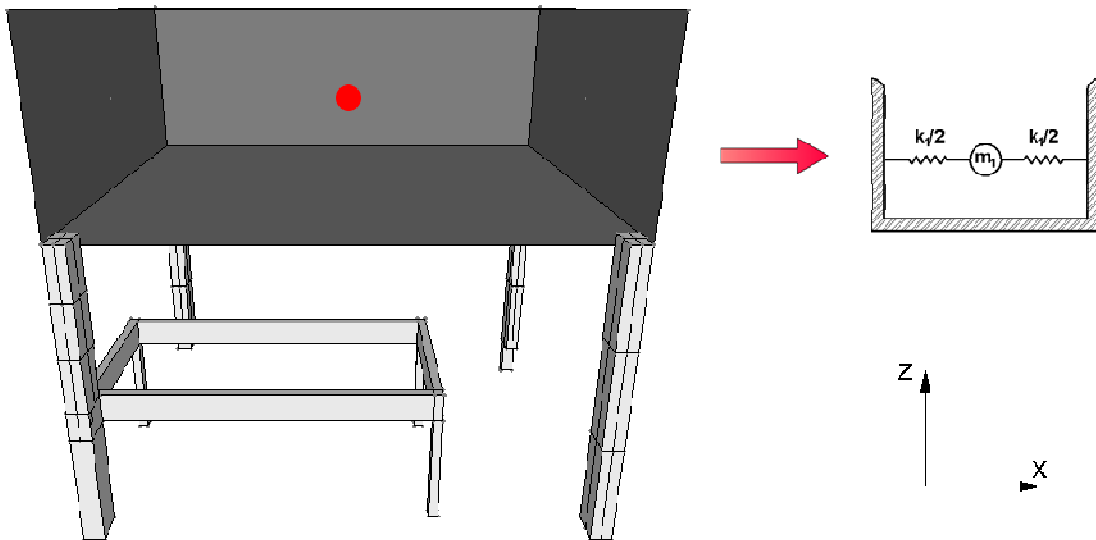
Tabela 4 – Parâmetros do TLD de Housner para as diferentes colunas d'água simuladas (h)

h (m)	0,5	0,8	1,1	1,4	1,7
m_0 (kg)	12329,65	19053,00	24971,87	29979,43	34075,47
m_1 (kg)	1469,74	3762,47	7110,76	11494,75	16855,62
k_1 (N/m)	16743,70	39983,12	68683,40	98991,19	127889,10
f (Hz)	0,537	0,519	0,495	0,467	0,438

Fonte: Autor

No modelo de elementos finitos, os valores de m_0 são divididos como força distribuída entre os quatro pilares que sustentam a caixa d'água. Elementos de barra de rigidez equivalente a $k_1/2$ partindo das laterais do reservatório, juntamente com uma massa concentrada m_1 , são utilizados para simular a água em movimento, conforme apresentado na Figura 9.

Figura 9 – Aplicação do modelo de Housner através de elementos de barra



Fonte: Autor

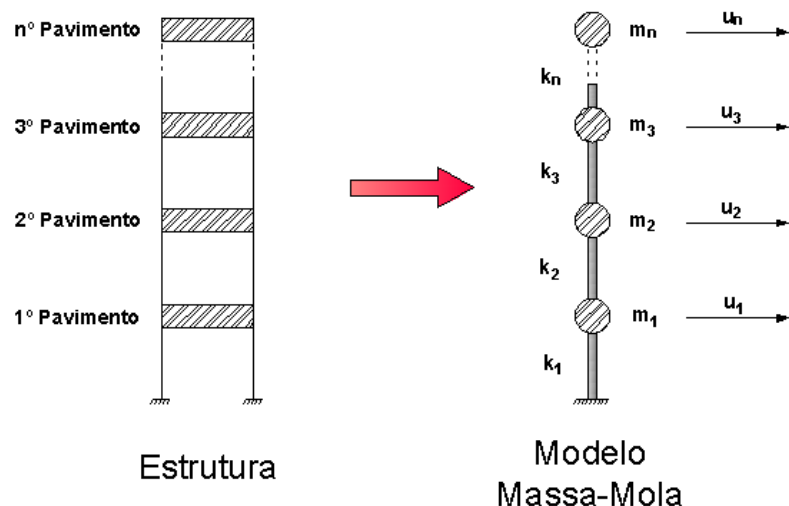
4. MODELAGEM DO EDIFÍCIO EM SISTEMA MASSA-MOLA E CÁLCULO DOS CARREGAMENTOS DINÂMICOS DE VENTO

4.1 Modelo Massa-Mola

Para validar os resultados da modelagem por elementos finitos, faz-se necessário executar também um modelo que utilize um método alternativo, para então comparar os valores encontrados. Desta forma, representou-se o edifício analisado por modelo massa-mola clássico com 14 graus de liberdade (considerando apenas os pavimentos), 15 graus de liberdade (considerando a estrutura do reservatório) e 16 graus de liberdade (considerando também a água como ALS), de forma a validar cada etapa da modelagem em elementos finitos.

A Figura 10 mostra simplificada o sistema massa-mola. Os pilares do pavimento n são transformados em uma única mola de rigidez equivalente k_n , e a massa de todo o pavimento é reduzida a um elemento de massa concentrada m_n , sendo desconsiderada a ductibilidade da estrutura.

Figura 10 – Construção do modelo massa-mola equivalente



Fonte: Autor

A vibração livre do sistema massa-mola é regida pela seguinte equação de movimento:

$$[M].\ddot{\underline{u}} + [K].\underline{u} = 0 \quad (10)$$

onde $[M]$ é a matriz de massa, $[K]$ é a matriz de rigidez do sistema e \underline{u} é o vetor deslocamento.

É importante ressaltar que a matriz $[K]$ representa a rigidez lateral equivalente do sistema em uma dada direção (adotada nesta análise como aquela que oferece menores valores de k_n), de forma que o vetor \underline{u} é o conjunto dos deslocamentos de cada grau de liberdade nesta mesma direção.

A Equação 10 apresenta solução harmônica do tipo $u_n = e^{\omega_n \cdot i \cdot t}$, onde ω_n é uma constante que representa uma das frequências angulares do sistema. A obtenção das frequências de vibração se resume, então, a um problema de autovalores e autovetores, de forma que

$$\ddot{\underline{u}} = \begin{bmatrix} -\omega_1^2 \cdot e^{\omega_1 \cdot i \cdot t} \\ \vdots \\ -\omega_n^2 \cdot e^{\omega_n \cdot i \cdot t} \end{bmatrix} = -\lambda \cdot \underline{u}, \quad \lambda = [\omega_1^2 \quad \dots \quad \omega_n^2] \quad (11)$$

$$([K] - \lambda \cdot [M]).\underline{u} = 0 \quad (12)$$

4.2 Carga Dinâmica do Vento

O cálculo do carregamento dinâmico do vento é feito de acordo com a norma NBR 6123:1988. Este documento propõe uma formulação que leva em conta fatores como a forma da seção transversal da estrutura (quadrada, circular, ...), a topografia do terreno, a altura da edificação, entre outros, chamada pela norma de equação simplificada, e é definida como

$$q(z) = 0,613 \cdot \nabla_p^2 \cdot b^2 \cdot \left[\left(\frac{z}{z_r} \right)^{2 \cdot p} + \left(\frac{h}{z_r} \right)^p \cdot \left(\frac{z}{h} \right)^\gamma \cdot \frac{1 + 2 \cdot \gamma}{1 + \gamma + p} \cdot \xi \right] \quad (13)$$

onde $q(z)$ é a pressão dinâmica do vento, em dada cota z ; ∇_p é a velocidade de projeto; b e p são parâmetros dependentes da rugosidade do terreno; z_r é a cota de referência (10 m); h é a altura da edificação acima do terreno; γ e ξ são parâmetros para a determinação de efeitos dinâmicos.

É importante destacar que, diferentemente dos carregamentos estáticos, a velocidade de projeto não depende do fator de rugosidade do terreno S_2 , e para uma edificação qualquer é dada por

$$V_p = 0,69 \cdot V_0 \cdot S_1 \cdot S_3 \quad (14)$$

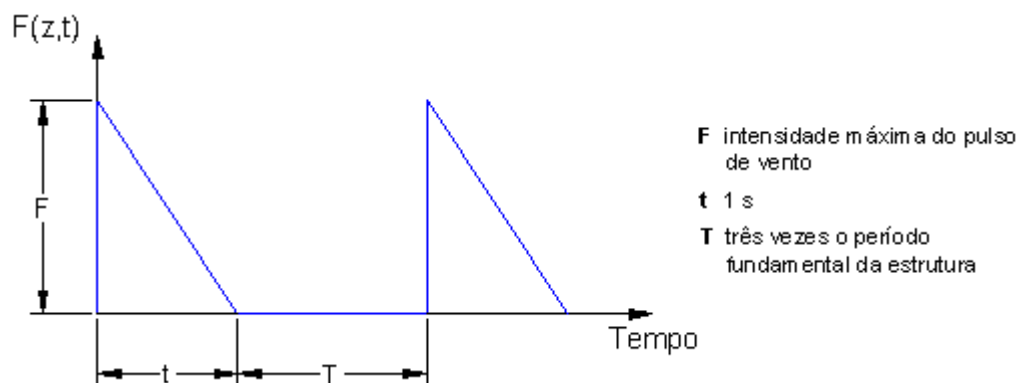
sendo S_1 e S_3 os fatores topográfico e estatístico, respectivamente, e V_0 a velocidade básica regional do vento.

A pressão $q(z)$ é então multiplicada pela dimensão horizontal da fachada na qual atua (L) e pelo coeficiente de arrasto (C_a), de modo a encontrar uma força distribuída equivalente $F(z)$ ao longo da altura do edifício. Para o cálculo do coeficiente de arrasto, supõe-se que o edifício é perfeitamente retangular, de forma a possibilitar o uso dos ábacos fornecidos pela norma.

$$F(z) = q(z) \cdot C_a \cdot L \quad (15)$$

A NBR 6123:1988 especifica como calcular a intensidade máxima de rajadas dinâmicas de vento, mas não sua forma. Estas rajadas podem ser descritas como uma série de pulsos triangulares, conforme apresentado por Blessmann (1998), citando o trabalho de Rausch (1933). Estes pulsos de período igual a 1 s possuem intensidade máxima igual à calculada utilizando a metodologia da norma, e são espaçados por intervalo de tempo igual a três vezes o período natural de vibração do edifício atingido. A Figura 11 exemplifica como se comporta o carregamento descrito.

Figura 11 – Representação do carregamento dinâmico do vento

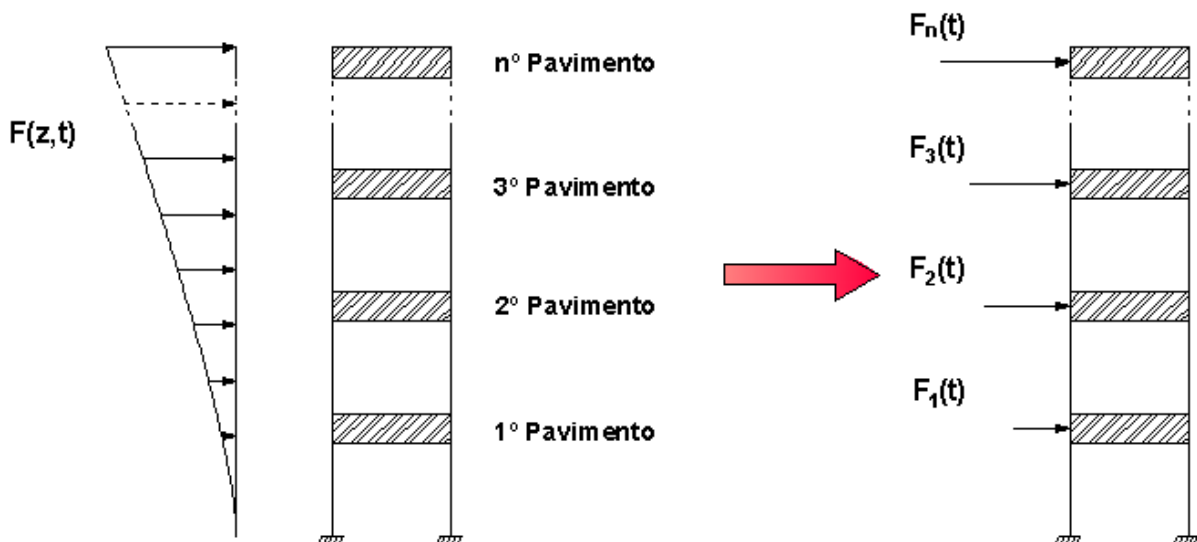


Fonte: Autor

É importante frisar que o carregamento do vento é distribuído ao longo de toda a lateral do prédio, de modo que se optou por trabalhar com cargas equivalentes aplicadas lateralmente em cada pavimento, de forma a facilitar a utilização dos modelos previamente apresentados.

A Figura 12 mostra o carregamento dinâmico do vento $F(z,t)$, função da cota z na qual é medida e do tempo t , distribuída ao longo da lateral do edifício. Este carregamento é substituído por forças equivalentes $F_n(t)$, que são aplicadas tanto no modelo em elementos finitos quanto no sistema massa-mola.

Figura 12 – Equivalência da carga de vento distribuída a forças localizadas



Fonte: Autor

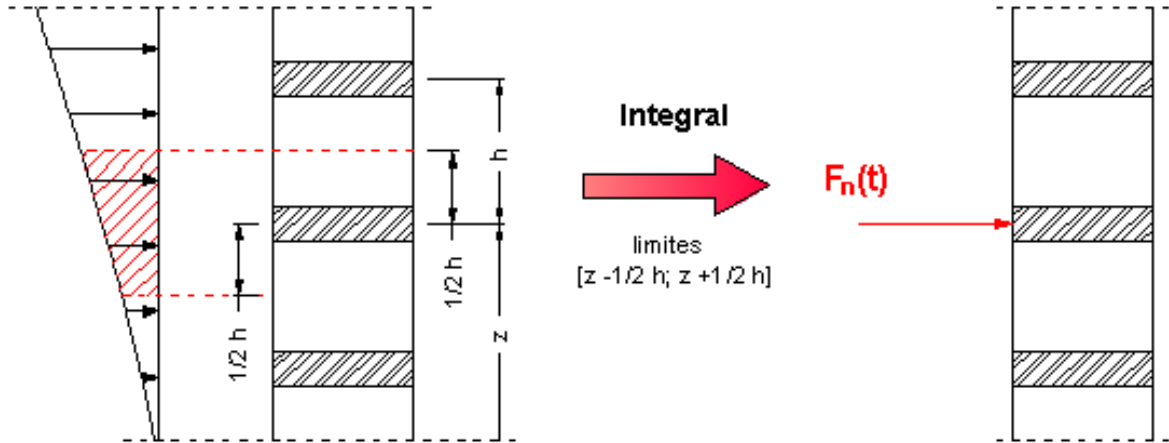
A equação de movimento do sistema massa-mola passa agora a conter um termo relativo ao carregamento dinâmico do vento, sendo escrita como

$$[M]. \ddot{\underline{u}} + [K]. \underline{u} = [F_n(t)] \quad (16)$$

Observa-se que a função que descreve o carregamento dinâmico do vento, e consequentemente os termos da matriz $[F_n(t)]$, apresenta diversas descontinuidades (como apresentado na Figura 11), de forma que a equação de movimento possui solução analítica, porém dispendiosa. Desta forma, optou-se pela utilização de métodos de integração numérica, como o método de Newmark com aceleração média constante ($\gamma = 1/2$ e $\beta = 1/4$), tal como proposto por Viana (2008). A Tabela 5 contém os valores de cada $F_n(t)$, calculados pela

integral do carregamento $F(z,t)$ entre $[z-h/2; z+h/2]$, sendo h a distância entre dois pavimentos adjacentes, conforme apresentado na Figura 13.

Figura 13 – Cálculo de $F_n(t)$



Fonte: Autor

Tabela 5 – Valores máximos de $F_n(t)$ para cada pavimento

n	F_n	n	F_n
1	1522,564	8	8095,327
2	2516,273	9	9011,99
3	3478,742	10	9929,971
4	4416,612	11	10849,84
5	5342,427	12	11772,006
6	6262,171	13	12696,737
7	7179,143	14	6696,001

Fonte: Autor

5. ANÁLISES REALIZADAS E RESULTADOS OBTIDOS

5.1 Validação do Modelo em Elementos Finitos

Antes de proceder a qualquer análise da influência da caixa d'água no comportamento global da estrutura, é necessário verificar a convergência do modelo em elementos finitos através de uma comparação entre as frequências de vibração do edifício com o modelo analítico. Nesta análise modal, são comparadas, inicialmente, as cinco primeiras frequências de vibração correspondentes à flexão da estrutura na direção de menor rigidez lateral equivalente (menores k_n), dadas as restrições do sistema massa-mola anteriormente citadas. Ambas as simulações são feitas para a estrutura principal do edifício sem considerar a caixa d'água.

A Tabela 6 mostra a comparação entre os resultados obtidos. Observa-se que a diferença entre as três primeiras frequências de vibração dos dois modelos é inferior a 3%. Tal diferença é esperada, dado que o modelo em elementos finitos considera aspectos estruturais que o modelo simplificado negligencia, de forma que se verifica a convergência da modelagem em elementos finitos.

Tabela 6 – Comparação entre frequências de vibração massa-mola x elementos finitos (sem caixa d'água)

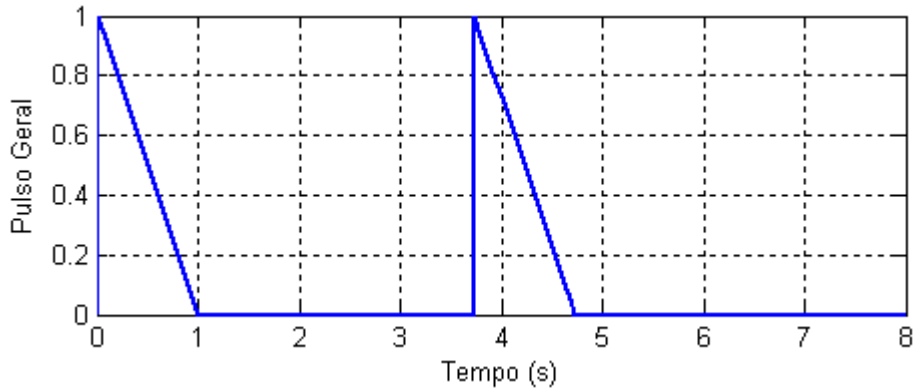
Flexão	Frequência (Hz)		Diferença (%) em relação ao modelo massa-mola
	Modelo Massa-Mola	Modelo Elementos Finitos	
1ª	1,131	1,100	-2,74
2ª	3,378	3,310	-2,01
3ª	5,580	5,590	0,17
4ª	7,715	7,844	1,67
5ª	9,765	10,047	2,89

Fonte: Autor

Além das frequências de vibração naturais do sistema, é necessário verificar como ambos os modelos se comportam quando submetidos ao carregamento dinâmico do vento. Os valores desta força utilizados para a análise dos deslocamentos laterais do edifício são aqueles apresentados na seção 6, considerando dois pulsos triangulares de vento. A forma geral do carregamento aplicado encontra-se na Figura 14. Para a construção deste gráfico, considerou-

se $f = 1,100$ Hz como a frequência fundamental da estrutura (que corresponde a um período fundamental de 0,884 s).

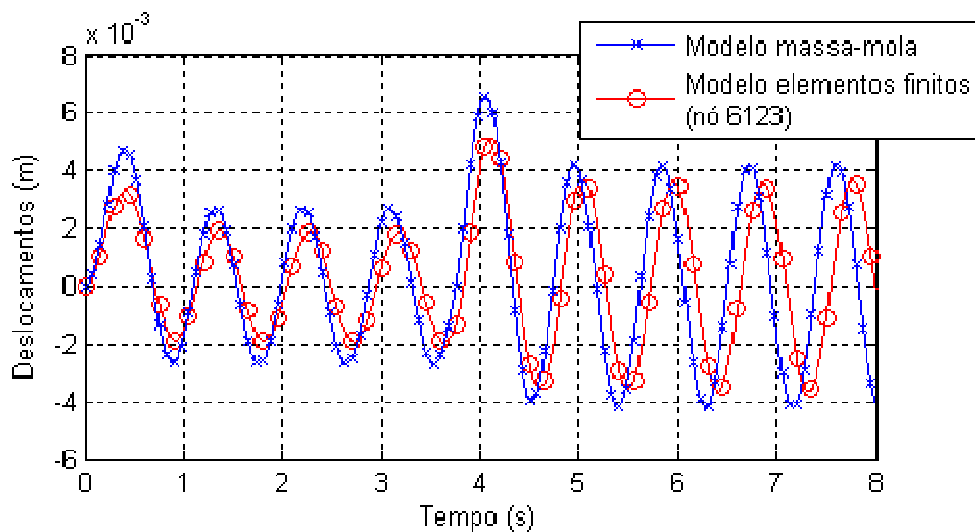
Figura 14 – Forma geral do pulso de vento aplicado



Fonte: Autor

A Figura 15 apresenta os valores de deslocamento no topo da edificação, obtidos através da simulação dos dois modelos sem caixa d'água. Observa-se que as duas respostas encontradas possuem frequência próxima, fato esperado por conta da similaridade entre as frequências naturais de vibração verificadas anteriormente para as duas simulações. As amplitudes das duas respostas encontram-se na mesma ordem de grandeza, com diferença máxima de aproximadamente 1,48 mm, observada no pico inicial. Considera-se, então, a validade de ambos os modelos baseando-se nos resultados obtidos.

Figura 15 – Deslocamentos laterais do edifício sem caixa



Fonte: Autor

5.2 Efeitos da Caixa d'Água Vazia Sobre as Frequências de Vibração do Edifício

Buscando avaliar a totalidade dos efeitos da caixa d'água sobre o comportamento dinâmico da estrutura, faz-se uma primeira análise verificando a influência do reservatório vazio nas frequências de vibração do prédio, utilizando os modelos em EF para tal.

A Tabela 7 apresenta uma comparação entre as frequências de vibração da estrutura com e sem caixa d'água, onde os eixos x , y e z definidos são os mesmos das Figuras 7 e 8. Nesta tabela, vê-se que a estrutura de concreto do reservatório reduz o valor das três primeiras frequências de ressonância do sistema. Em edifícios altos, com frequências naturais de vibração próximas de 1 Hz, tal redução pode representar um perigo real para a estrutura, pois sua frequência natural se aproxima da do carregamento dinâmico de vento, segundo a NBR 6123:1988, o que pode levar à ressonância do sistema.

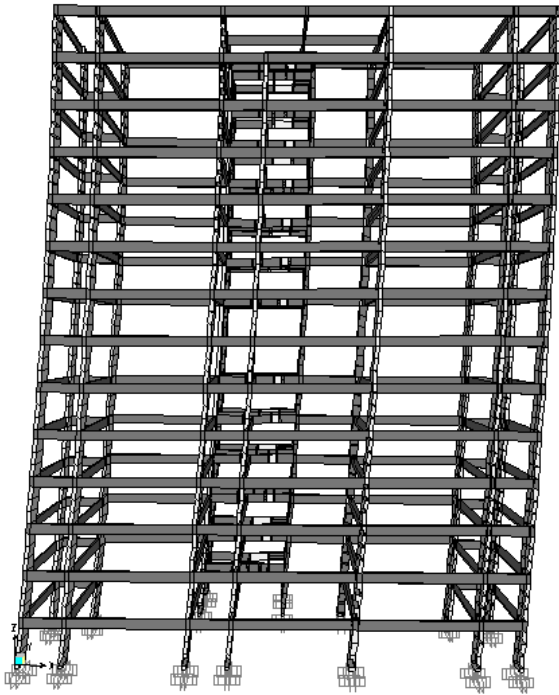
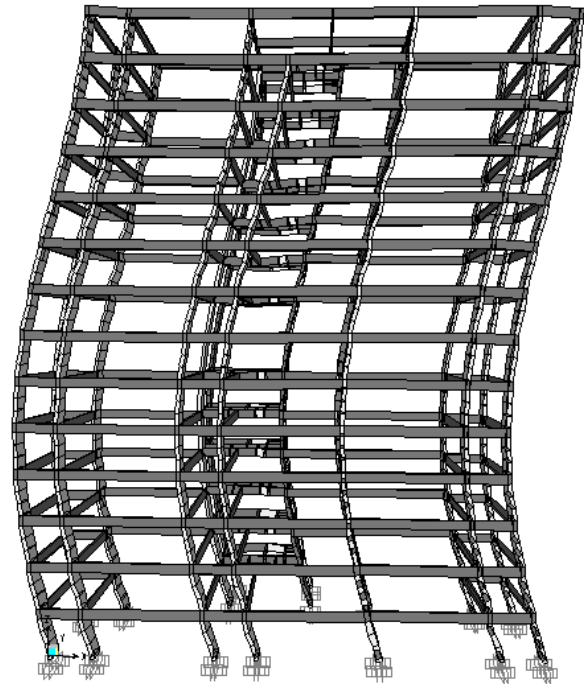
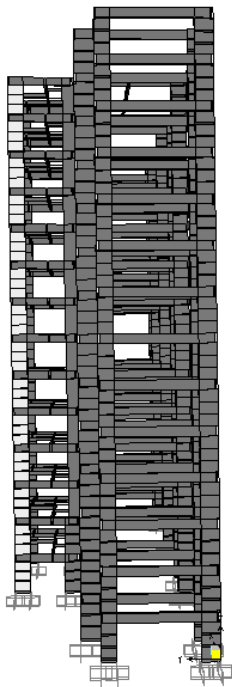
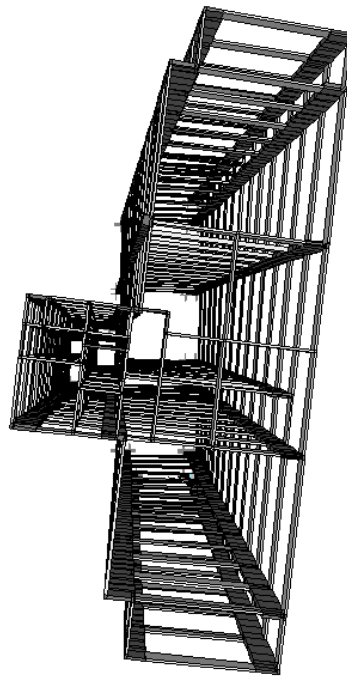
A Figura 16 mostra a forma geral do deslocamento para a primeira e segunda flexões em y , primeira flexão em x e primeira torção em z , respectivamente. Em adição às frequências já discutidas, a estrutura com caixa d'água vazia acoplada apresentou outras frequências com formas de onda diferentes das até então encontradas. Nestas frequências, o reservatório funciona como um elemento mecânico acoplado à estrutura, e não como parte dela, vibrando enquanto o restante da estrutura permanece quase indesejado (FIGURA 17).

Tabela 7 – Comparação entre frequências de vibração da estrutura com e sem caixa

Tipo de movimento	Direção	Frequência (Hz)		Diferença (%) em relação ao caso sem caixa
		Sem caixa	Com caixa	
1ª Flexão	y	1,100	1,062	-3,45%
1ª Flexão	x	1,688	1,598	-5,33%
1ª Torção	z	1,890	1,825	-3,44%
2ª Flexão	y	3,310	3,502	5,80%
3ª Flexão	y	5,590	5,672	1,47%
2ª Flexão	x	5,688	5,590	1,72%
2ª Torção	z	6,300	6,502	3,21%
4ª Flexão	y	7,844	7,883	0,05%

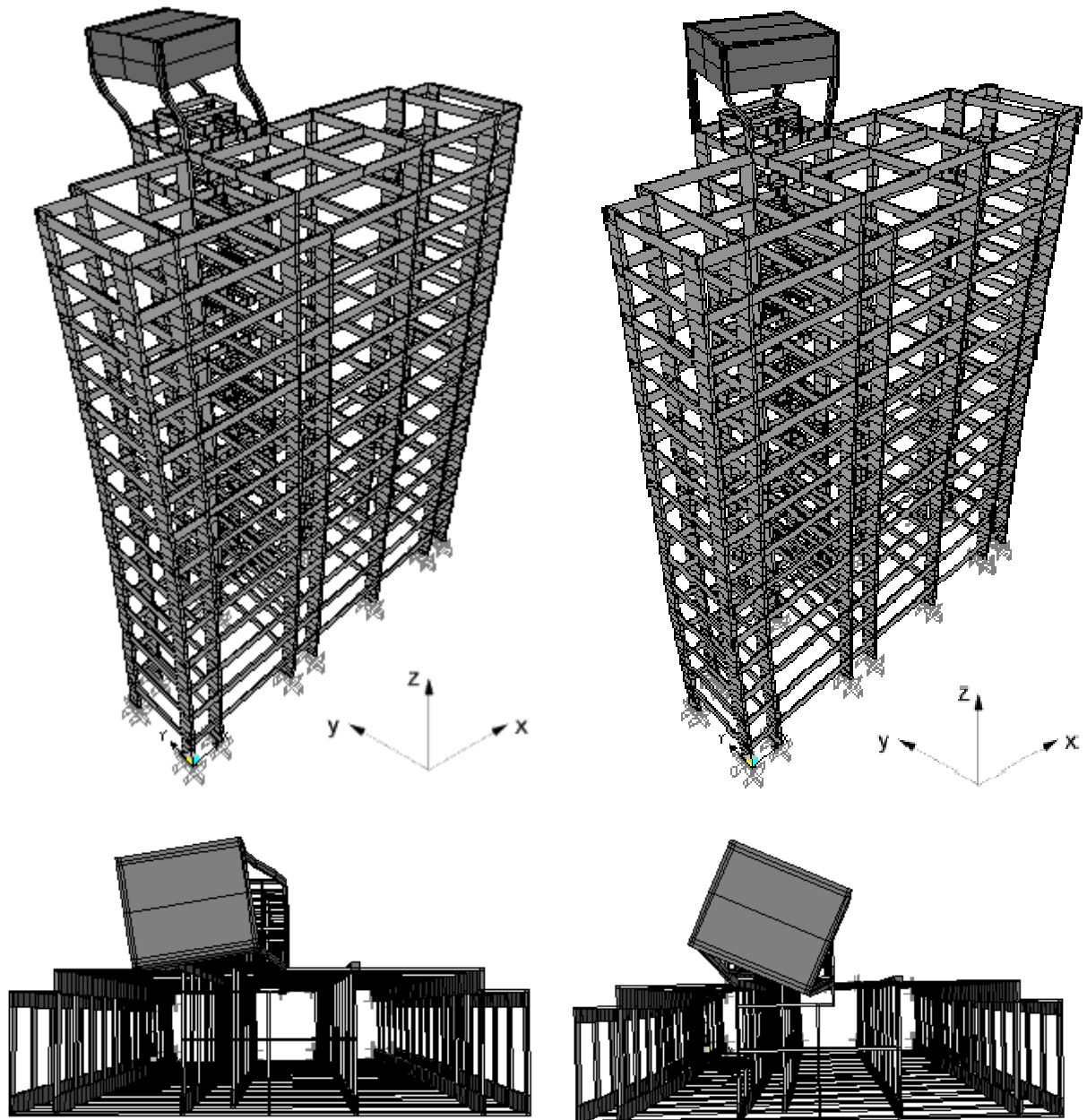
Fonte: Autor

Figura 16 – Principais modos de vibração da estrutura

(a) 1ª Flexão em y (b) 2ª Flexão em y (c) 1ª Flexão em x (d) 1ª Torção em z

Fonte: Autor

Figura 17 – Modos onde a caixa vibra como estrutura acoplada



(a) Flexão de massa acoplada em y

(b) Torção da massa acoplada em z

Fonte: Autor

5.3 Influência da Caixa d'Água Sobre o Deslocamento Lateral do Edifício

Após a análise dos modos de vibração da estrutura com e sem reservatório, observa-se agora os efeitos da caixa d'água nos deslocamentos laterais do edifício devido ao carregamento dinâmico do vento. Utilizando o modelo em elementos finitos, são simulados

sete casos de utilização: estrutura sem reservatório, estrutura com reservatório vazio e com reservatório cheio (considerando as cinco alturas de coluna d'água descritas em 3.3).

A Figura 18 apresenta três dos casos simulados: prédio sem caixa d'água, com caixa vazia e com caixa cheia (1,7 m de coluna d'água). Observa-se que o acréscimo da caixa d'água vazia aumenta a amplitude dos deslocamentos laterais devido ao vento, diferença que chega a aproximadamente 8% (em relação ao caso sem caixa). Ainda na mesma figura, percebe-se que o acréscimo da água no reservatório (1,7 m de profundidade) reduz os deslocamentos da estrutura em relação ao caso com caixa vazia, ou seja, o reservatório cheio funciona como ALS, utilizando o modelo de Housner. As Figura 19 e Figura 20 confirmam esta tendência para outras colunas d'água (1,4, 1,1, 0,8 e 0,5 m), e mostram que o aumento do volume de líquido no reservatório acarreta em uma redução dos deslocamentos laterais devidos ao vento.

Para validar os resultados obtidos, comparam-se novamente os resultados do modelo em elementos finitos com o sistema massa-mola. A Figura 21 apresenta a curva obtida com os dois modelos para uma mesma profundidade de água de 1,1 m. Observa-se que as curvas possuem novamente comportamento similar, garantindo a validade das duas simulações.

Figura 18 – Deslocamentos do nó 6637 para sistema com caixa vazia, sem caixa e caixa com 1,7 m de água

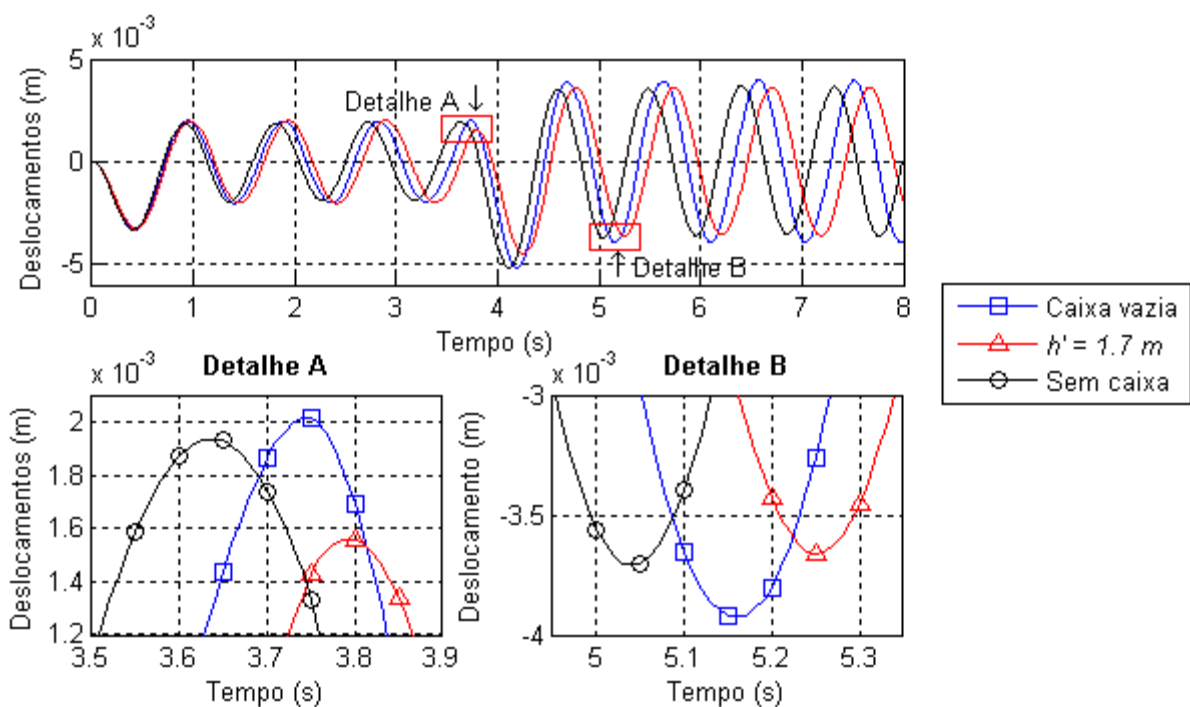
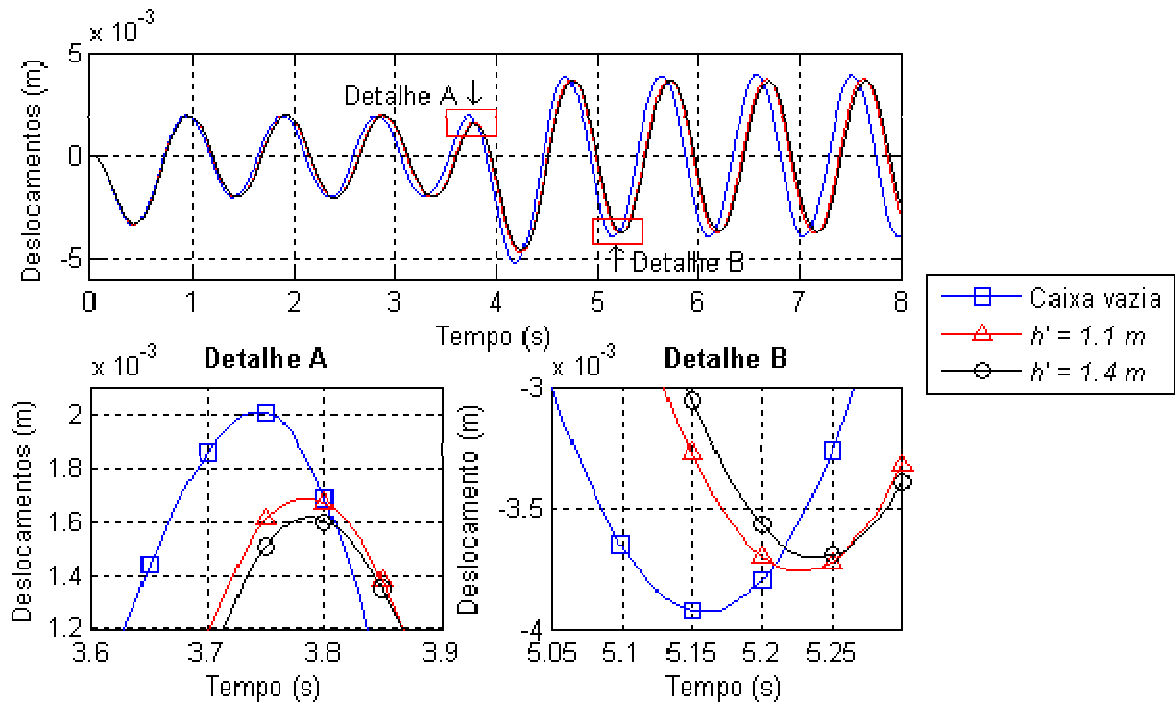
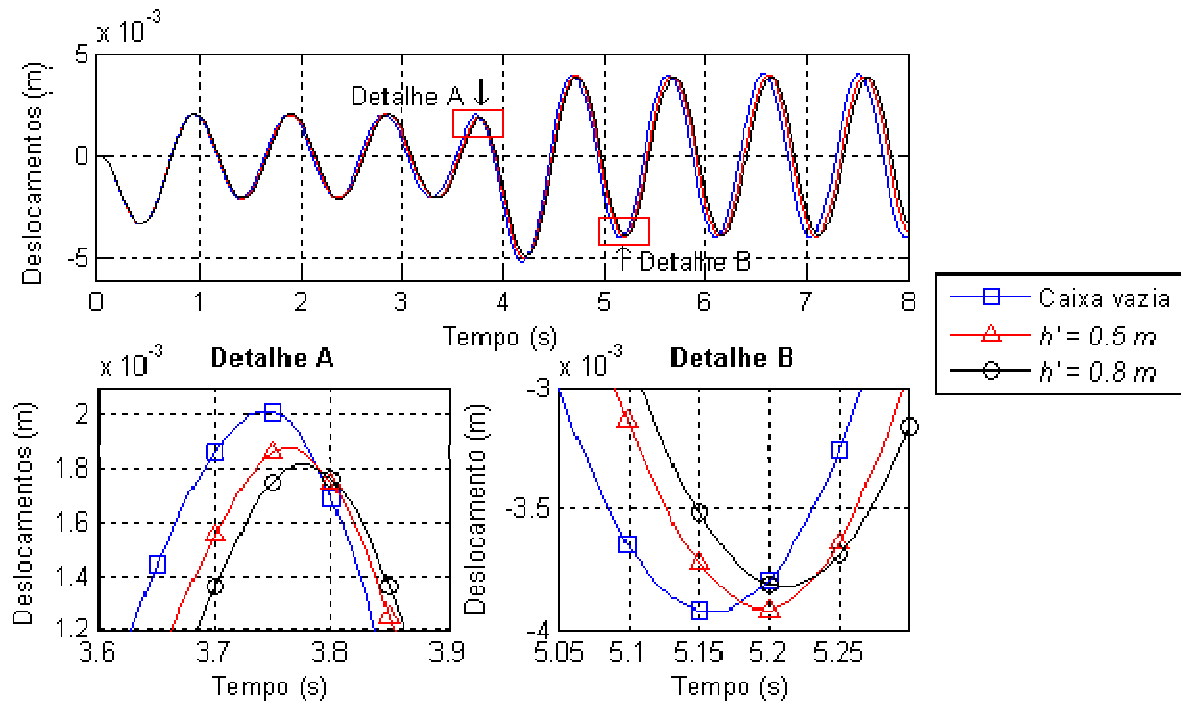


Figura 19 – Deslocamentos do nó 6637 para sistema com caixa vazia e caixa com 1,1 e 1,4 m de água



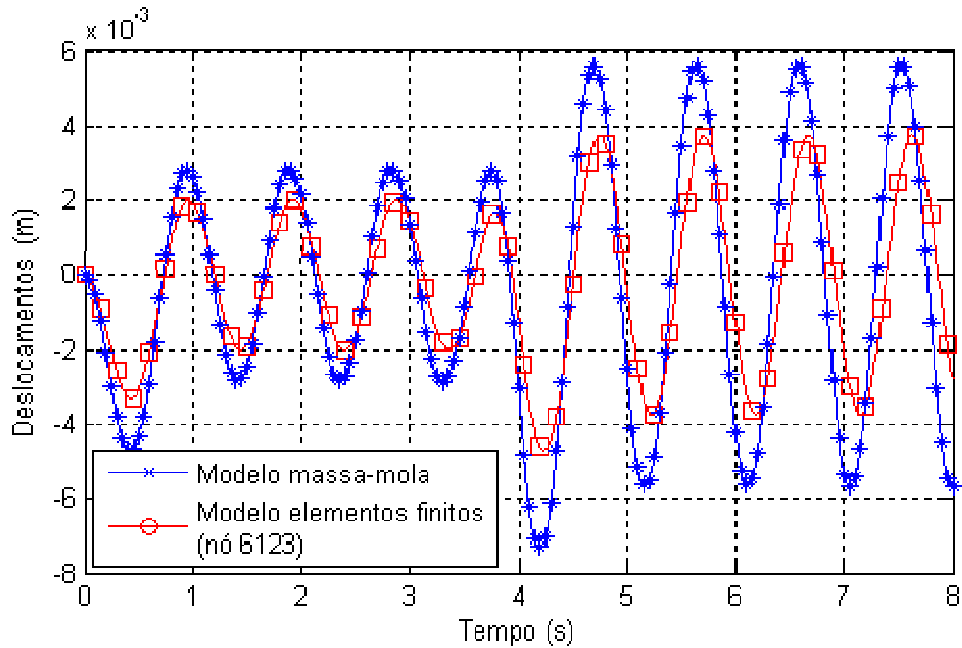
Fonte: Autor

Figura 20 – Deslocamentos do nó 6637 para sistema com caixa vazia e caixa com 0,5 e 0,8 m de água



Fonte: Autor

Figura 21 – Modelo massa-mola e modelo elementos finitos com caixa e coluna d'água de 1,1 m



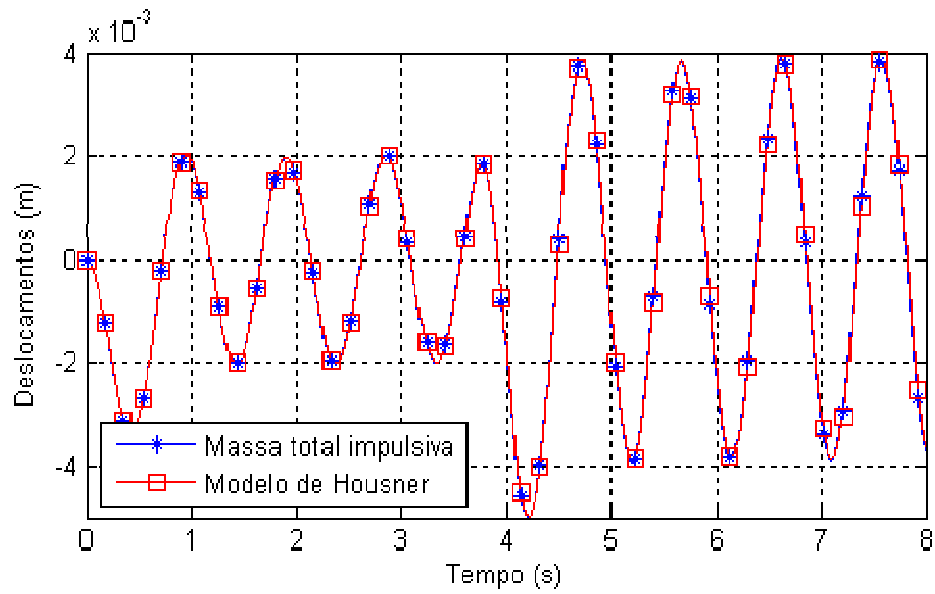
Fonte: Autor

5.4 Comparação Entre a Modelagem da Água Pelo Modelo de Housner ou Como Massa Impulsiva

Observou-se que a consideração do movimento da água segundo o modelo de Housner atenuou o deslocamento lateral da estrutura submetida ao vento, mas resta ainda verificar se a consideração do movimento da água no tanque é necessária para uma correta modelagem do comportamento dinâmico da estrutura. Para verificar a influência de considerar ou não o movimento da água, retomam-se dois dos casos já analisados: 0,5 m e 1,7 m de água no reservatório. Ambos os casos são simulados segundo Housner e como massa totalmente impulsiva.

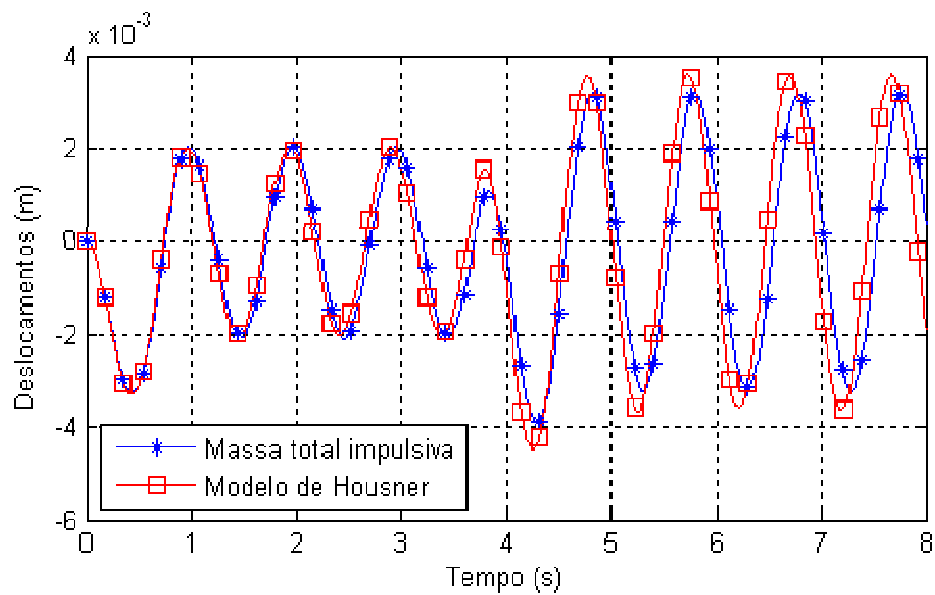
As Figura 22 e 23 apresentam a comparação entre os deslocamentos no topo da estrutura para o caso $h = 0,5$ m e $h = 1,7$ m, respectivamente. Observa-se que, para menores volumes de água no reservatório, as curvas relativas às duas simulações se confundem. Com o aumento do volume de água, a consideração do modelo de Housner implica em deslocamentos ligeiramente maiores (7,4% maior em relação ao caso puramente impulsivo).

Figura 22 – Comparação massa total impulsiva e modelo de Housner - $h = 0,5$ m



Fonte: Autor

Figura 23 – Comparação massa total impulsiva e modelo de Housner - $h = 1,7$ m



Fonte: Autor

6. CONCLUSÃO E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Este trabalho buscou verificar o potencial de amortecimento de caixas d'água residenciais na redução dos deslocamentos laterais de edifícios devido ao carregamento dinâmico do vento. Neste sentido, foi modelado um edifício residencial de 14 pavimentos por dois modelos diferentes: um sistema massa-mola implementado em MATLAB R2012a e um modelo em elementos finitos no programa SAP2000 v14 (CSI, 2009). Ambos os modelos foram submetidos aos carregamentos dinâmicos de vento prescritos na NBR 6123:1988, e o efeito da caixa d'água como amortecedor de líquido sintonizado foi verificado através da análise dos deslocamentos obtidos, considerando o modelo de Housner.

Observou-se que um reservatório elevado para abastecimento residencial pode impactar consideravelmente o comportamento dinâmico de um edifício. A influência do tanque vazio sobre a estrutura pode levá-lo a ter modos de vibração indesejados e próximos à frequência do vento, causando o aparecimento da ressonância.

A utilização do modelo de Housner para representar a água em movimento dentro do tanque mostra que ela possui potencial para mitigar deslocamentos laterais, mas se restringe a combater o aumento de amplitude causado pela estrutura do reservatório. A variação de volume devido ao consumo diário interfere na capacidade da água de amortecer, de forma que o reservatório tal como foi dimensionado não é um meio efetivo de regular os deslocamentos laterais.

As dimensões da caixa d'água projetada resultaram em frequências naturais de vibração da água distantes das do edifício, e ALS funcionam com maior eficiência quando os dois sistemas possuem frequências naturais similares. Técnicas propostas na literatura como a modificação do reservatório e a adição de partículas sólidas para aumentar a dissipação de energia são pouco práticas para melhorar o desempenho da caixa d'água como amortecedor, tendo em vista que prejudicariam as ações de limpeza do sistema e de abastecimento dos condôminos, de forma que outras soluções devem ser buscadas para melhorar o desempenho de caixas d'água como ALS.

Quanto à necessidade de considerar o movimento da água dentro do reservatório nas simulações, os resultados mostram que adotar a água como uma massa sólida pouco modifica os deslocamentos obtidos, dispensando o uso de modelos mais refinados, como o de Housner, que considera a interação fluido-estrutura em sua constituição. No cálculo estrutural

de edifícios altos, porém, onde a amplitude dos deslocamentos são maiores, o movimento do fluido deve ser novamente estudado.

Optou-se, neste trabalho, por utilizar um modelo mecanístico puramente elástico para simular o movimento da água, de forma que a dissipação de energia devido ao comportamento viscoso da água não foi considerada. Sugere-se para trabalhos futuros a modelagem da massa convectiva pelo modelo de Yu, de forma a verificar a contribuição da dissipação viscosa para a redução de deslocamentos laterais. Além disso, propõe-se, também, uma revisão técnica sobre os diferentes tipos de caixa d'água utilizados em estruturas, pois as formas de apoiar e construir o reservatório podem impactar diferentemente a estrutura global. Propõe-se, também, uma etapa experimental com modelos reduzidos e uso de acelerômetros, para verificar experimentalmente os resultados obtidos neste projeto.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5626**: Instalação predial de água fria. 1998.

_____. **NBR 6118**: Projeto de estruturas de concreto - Procedimento. 2014.

_____. **NBR 6123**: Forças devidas ao vento em edificações. 1988.

CAGECE -- COMPANHIA DE ÁGUA E ESGOTO DO CEARÁ. Normas Técnicas para Projetos de Sistemas de Abastecimento de Água e Esgotamento Sanitário. 2010.

CHANDRASEKARAN, A. R.; KRISHNA, J. Water towers in seismic zones. In: WORLD CONFERENCE ON EARTHQUAKE ENGINEERING, 3, 1965, Nova Zelândia. 1965. v. IV, p. 161-171.

CORPO DE BOMBEIROS MILITAR DO ESTADO DO CEARÁ. **Norma Técnica N° 06**: Sistema de hidrantes para combate a incêndio. 2008.

DEN HARTOG, J. P. **Mecánica de las vibraciones**. Cidade do México: Compañía Editorial Continental, 1964.

EPSTEIN, H. I. Seismic Design of Liquid-Storage Tanks. **Journal of the Structural Division**, v. 102, n. 9, p. 1659–1673, 1976.

FRAHM, H. **Means for damping the rolling motion of ships**. US Pat. 970.368, 13 set. 1910. 6p.

FUJINO, Y.; PACHECO, B. M.; CHAISERI, P.; SUN, L. M. Parametric Studies on Tuned Liquid Damper (TLD) Using Circular Containers by Free-Oscillation Experiments. **Doboku Gakkai Ronbunshu**, v. 5, n. 2, p. 177–187, 1988.

GRAHAM, E. W.; RODRIQUEZ, A. M. **The Characteristics of Fuel Motion which Affect Airplane Dynamics**. Santa Monica, Estados Unidos: Douglas Aircraft Company, 1951.

HOUSNER, G. W. The dynamic behavior of water tanks. **Bulletin of the Seismological Society of America**, v. 53, n. 2, p. 381–387, 1963.

KAREEM, A. Mitigation of wind induced motion of tall buildings. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, v. 11, n. 1–3, p. 273–284, 1983.

_____. Reduction of wind induced motion utilizing a tuned sloshing damper. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, v. 36, Part 2, p. 725–737, 1990.

KAREEM, A.; SUN, W. -J. Stochastic response of structures with fluid-containing appendages. **Journal of Sound and Vibration**, v. 119, n. 3, p. 389–408, 1987.

KAREEM, A.; KIJEWSKI, T.; TAMURA, Y. Mitigation of motions of tall buildings with specific examples of recent applications. **Wind and Structures**, v. 2, n. 3, p. 201–251, 1999.

KITADA, Y.; WATANABE, H.; SHIOYA, K.; *et al.* Tuned liquid damper using heat storage tanks. In: WORLD CONFERENCE ON EARTHQUAKE ENGINEERING, 10, 1992, Rotterdam, Holanda. 1992. p. 3377–3380.

LAMB, H. **Hydrodynamics**. 6. ed. Nova Iorque: Dover Publications, 1945.

LIVAOĞLU, R. Investigation of seismic behavior of fluid–rectangular tank–soil/foundation systems in frequency domain. **Soil Dynamics and Earthquake Engineering**, v. 28, n. 2, p. 132–146, 2008.

LIVAOĞLU, R.; DOĞANGÜN, A. Simplified seismic analysis procedures for elevated tanks considering fluid–structure–soil interaction. **Journal of Fluids and Structures**, v. 22, n. 3, p. 421–439, 2006.

MATLAB, R2012a (7.14.0.739). Natick, Estados Unidos: MathWorks, 2012

MORSY, H. **A Numerical Study of The Performance of Tuned Liquid Dampers**, 2010. 112 p. Dissertação de Mestrado, McMaster University, Ontario, Canadá.

SAP2000, 14.0.0. Berkeley, Estados Unidos: Computers and Structures, Inc, 2009

SOONG, T. T.; SPENCER JR, B. F. Supplemental energy dissipation: state-of-the-art and state-of-the-practice. **Engineering Structures**, v. 24, n. 3, p. 243–259, 2002.

TAMURA, Y.; FUJII, K.; OHTSUKI, T.; *et al.* Effectiveness of tuned liquid dampers under wind excitation. **Engineering Structures**, v. 17, n. 9, p. 609–621, 1995.

VIANA, A. C. P. **Análise Dinâmica de Estruturas de Edifícios Submetidas a Cargas de Vento**. 2008. 56 p. Projeto de Graduação, Universidade Federal do Ceará.

YU, J.-K.; WAKAHARA, T.; REED, D. A. A non-linear numerical model of the tuned liquid damper. **Earthquake Engineering & Structural Dynamics**, v. 28, n. 6, p. 671–686, 1999.

.
.